



**VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ**  
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



**FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH  
TECHNOLOGIÍ**  
ÚSTAV MIKROELEKTRONIKY

**FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION**  
**DEPARTMENT OF MICROELEKTRONICS**

# **ZJIŠŤOVÁNÍ SPOLEHLIVOSTI PÁJENÝCH SPOJŮ V OCHRANNÉ ATMOSFÉŘE**

INVESTIGATION OF RELIABILITY FOR SOLDER JOINTS

**BAKALÁŘSKÁ PRÁCE**  
BACHELOR'S THESIS

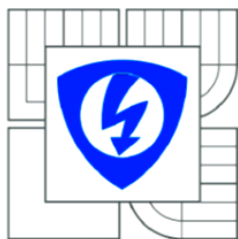
**AUTOR PRÁCE**  
AUTHOR

**MICHAL TOUFAR**

**VEDOUCÍ PRÁCE**  
SUPERVISOR

**doc. Ing. IVAN SZENDIUCH, CSc.**

BRNO 2014



VYSOKÉ UČENÍ  
TECHNICKÉ V BRNĚ

Fakulta elektrotechniky  
a komunikačních technologií

Ústav mikroelektroniky

# Bakalářská práce

bakalářský studijní obor  
Mikroelektronika a technologie

**Student:** Michal Toufar  
**Ročník:** 3

**ID:** 146116  
**Akademický rok:** 2013/2014

## NÁZEV TÉMATU:

**Zjišťování spolehlivosti pájených spojů v ochranné atmosféře**

## POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

Proveďte rešerši literatury o vlivu pájení v ochranné atmosféře. Navrhněte a popište test pájitelnosti. Ověřte vliv různých koncentrací dusíkové atmosféry na jakost pájeného spoje pro povrchovou úpravu imerzní cín na organickém substrátu.

## DOPORUČENÁ LITERATURA:

Szendiuch, I.: Základy technologie mikroelektronických obvodů a systémů. VUT IUM, 2006, ISBN 80-214-3292-6

**Termín zadání:** 10.2.2014

**Termín odevzdání:** 5.6.2014

**Vedoucí práce:** doc. Ing. Ivan Szendiuch, CSc.

**Konzultanti bakalářské práce:**

**doc. Ing. Jiří Háze, Ph.D.**  
Předseda oborové rady

## UPOZORNĚNÍ:

Autor bakalářské práce nesmí při vytváření bakalářské práce porušit autorská práva třetích osob, zejména nesmí zasahovat nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a musí si být plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č. 40/2009 Sb.

## **ABSTRAKT**

Hodnotí se význam pájení v ochranné atmosféře. Faktory působící při procesu pájení přetavením v ochranné dusíkové atmosféře. Vyhodnocuje se jakost pájených spojů vlivem definovaného zbytkového kyslíku při procesu pájení. Dle použité povrchové úpravy na výslednou jakost spoje pro dva druhy bezolovnatých pájecích slitin.

## **KLÍČOVÁ SLOVA**

bezolovnatá pájka, pájení přetavením, dusík, kvalita pájeného spoje, povrchová úprava

## **ABSTRACT**

It evaluates the importance of soldering in a protective atmosphere. Factors influencing the process of reflow soldering in a protective atmosphere of nitrogen. Evaluates the quality of solder joints due to a defined residual oxygen during the soldering proces. According finishes used on the resulting quality connections for two types of lead free solder.

## **KEYWORDS**

lead – free solder reflow, nitrogen, quality of solder joint, surface finish

TOUFAR, M. *Zjišťování spolehlivosti pájených spojů*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2014. 89 s. Vedoucí práce: doc. Ing. Ivan Szendiuch, CSc..

## PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že svůj semestrální projekt na téma Zjišťování spolehlivosti pájených spojů jsem vypracoval samostatně pod vedením vedoucího semestrálního projektu a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou všechny citovány v práci a uvedeny v seznamu literatury na konci práce.

Jako autor uvedené semestrálního projektu práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením tohoto semestrálního projektu jsem neporušil autorská práva třetích osob, zejména jsem nezasáhl nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a/nebo majetkových a jsem si plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplívajících z ustanovení § 152 trestního zákona 140/1961 Sb.

V Brně dne .....

.....

(podpis autora)

## PODĚKOVÁNÍ

Děkuji vedoucímu bakalářské práce doc. Ing. Ivan Szendiuchovi, CSc za účinnou metodickou, pedagogickou a odbornou pomoc a další cenné rady při zpracování mé bakalářské práce. Rovněž děkuji panu Ing. Otáhalovi za užitečné a cenné rady, společnosti Semach s.r.o. za zhotovení testovacích substrátů s povrchovou úpravou a výzkumnému centru SIX za vyhotovení prvkové analýzy vzorků.

V Brně dne .....

.....

(podpis autora)

# OBSAH

<b>Seznam obrázků</b>	<b>viii</b>
<b>Seznam tabulek</b>	<b>ix</b>
<b>Seznam rovnic</b>	<b>xi</b>
<b>Úvod</b>	<b>12</b>
<b>1 Význam pájení v ochranné atmosféře</b>	<b>13</b>
1.1 Faktory působící v procesu pájení .....	13
1.1.1 Tvary pájených spojů a jejich poruchy .....	14
1.2 Hodnocení jakosti v procesu pájení .....	15
1.2.1 Stárnutí pájeného spoje .....	15
1.2.2 Tepelné namáhání .....	17
1.2.3 Mechanické namáhání .....	18
1.3 Pájení v dusíkové atmosféře .....	20
1.3.1 Charakteristické rysy pájení v ochranné atmosféře .....	21
1.3.2 Ochranná atmosféra při pájení přetavením .....	23
<b>2 Povrchová úprava pájených ploch</b>	<b>25</b>
2.1 Používané povrchy a povrchové úpravy .....	26
2.1.1 HASL (Hot Air Solder Leveling) .....	26
2.1.2 OSP (Organic Surface Protectives) .....	27
2.1.3 ENIG (Elektroless Nickel Immersion Gold) .....	28
2.1.4 ENEPIG (Electroless Nickel Electroless Palladium Immersion Gold) .....	28
2.1.5 Imersní cín (Immersion Tin) .....	29
<b>3 Bezolovnaté Pájky</b>	<b>30</b>
3.1 Prvky pájecích slitin .....	31
3.1.1 Pájka SAC305 (Sn96,5/Ag3,0/Cu0,5) .....	31
3.1.2 Pájka SN100C (Sn99,3/Cu0,7/Ni0,04/Ge0,01) .....	31
<b>4 Experimentální část</b>	<b>32</b>
4.1 Plán testů .....	33
4.1.1 Realizace testovaných vzorků .....	33
4.1.2 Naměřené hodnoty .....	38

4.1.3	Vyhodnocení roztékavosti pájky .....	40
4.2	Metalografické výbrusy přetavených pájecích slitin .....	45
4.2.1	SAC .....	45
4.2.2	SN100C .....	45
4.3	Prvkové analýzy vzorku .....	46
4.3.1	Analýza jednotlivých vrstev substrátu.....	46
4.3.2	Analýza povrchu substrátu .....	48
<b>5</b>	<b>Inovace experimentálního pracoviště</b>	<b>52</b>
	<b>Závěr</b>	<b>55</b>
	<b>Literatura</b>	<b>56</b>
	<b>Seznam příloh</b>	<b>58</b>

# SEZNAM OBRÁZKŮ

Obr. 1:	Ishikawa diagram pro proces pájení .....	13
Obr. 2:	Znázornění faktorů ovlivňující životnost pájených spojů [3].....	15
Obr. 3:	Znázornění vlivů stárnutí, namáhání a destrukce i intermetalické vrstvě [7]:..	16
Obr. 4:	Rozdělení koroze podle typu degradačního mechanismu .....	16
Obr. 5:	Celosvětové měřítko použití dusíku pro bezolovnaté pájení .....	20
Obr. 6:	Schématické znázornění pájecí pece a rozložení koncentrace dusíku v prostoru pece .....	23
Obr. 7:	Koncentrace dusíku v peci.....	24
Obr. 8:	Tržní podíl použití povrchových úprav v roce 2007 [14].....	26
Obr. 9:	HASL (Hot Air Solder Leveling) .....	27
Obr. 10:	OSP (Organic Surface Protectives) .....	27
Obr. 11:	ENIG (Elektroless Nickel Immersion Gold) .....	28
Obr. 12:	ENEPIG (Electroless Nickel Electroless Palladium Immersion Gold) .....	29
Obr. 13:	Imersní cín (Immersion Tin).....	29
Obr. 14:	Experimentální pracoviště a) Celkový pohled b) Detailní pohled na exsikátor s ukázkou pájeného spoje .....	32
Obr. 15:	Ishikawův diagram pro pájení v exsikátoru.....	33
Obr. 16:	Šablonový tisk Uniprint pmgo3v.....	34
Obr. 17:	Matrice pro ukotvení vzorků .....	34
Obr. 18:	a) Vyfocená šablona b) Natisknutá pájecí pasta na testovacím substrátu .....	35
Obr. 19:	Teplotní profil pro pájecí pastu LFM-48W TM-HP(L).....	35
Obr. 20:	Teplotní profil pro pájecí pastu Cobar-OT2-SN100C-T3 .....	36
Obr. 21:	Vzorky po přetavení v exsikátoru. ....	37
Obr. 22:	Software ScopePhoto - ukázkový snímek při měření bodu.....	38
Obr. 23:	Fotografie výchylkoměru.....	38
Obr. 24:	Znázornění měřících bodů na substrátu .....	40
Obr. 25:	Graf roztékavosti pájecí slitiny SAC305 s vyhodnocením vzorcem s vrchlíkem .....	43
Obr. 26:	Graf roztékavosti pájecí slitiny SN100C s vyhodnocením s vrchlíkem .....	43
Obr. 27:	Vyhodnocení pájecí slitiny SAC305 .....	44
Obr. 28:	Vyhodnocení pájecí slitiny SN100C .....	44
Obr. 29:	Výbrus po přetavení pájecí slitiny SAC305 bez ochranné atmosféry .....	45



Obr. 30:	Výbrus po přetavení pájecí slitiny SAC305 při zbytkové koncentraci kyslíku 20 ppm .....	45
Obr. 31:	Výbrus po přetavení pájecí slitiny SN100C bez ochranné atmosféry .....	45
Obr. 32:	Výbrus po přetavení pájecí slitiny SN100C při zbytkové koncentraci kyslíku 20 ppm .....	46
Obr. 33:	Snímek z elektronového mikroskopu pro podélný výbrus testovaného substrátu .....	46
Obr. 34:	Snímek zkoumané oblasti dle měřené linie pro koncentrační profil prvků .....	47
Obr. 35:	Výsledek analýzy zastoupení pro koncentrační profil .....	47
Obr. 36:	Zkoumaná oblast povrchu substrátu po přetavení bez ochranné atmosféry. ....	48
Obr. 37:	Spektrální analýza s koncentračním zastoupením prvků pro substrát bez ochranné atmosféry .....	48
Obr. 38:	Zastoupení jednotlivých prvků na zkoumaném povrchu substrátu .....	49
Obr. 39:	Zkoumaná oblast povrchu substrátu po přetavení s ochrannou atmosférou s koncentrací zbytkového kyslíku .....	50
Obr. 40:	Spektrální analýza povrchu s koncentračním zastoupením všech prvků po přetavení v ochranné atmosféře .....	50
Obr. 41:	Zastoupení jednotlivých prvků na zkoumaném povrchu substrátu .....	51
Obr. 42:	Box s řídicím obvodem pro spínání topných spirál .....	52
Obr. 43:	Schéma zapojení spínání topných těles .....	53
Obr. 44:	DPS rozměr desky 95 x 80, měřítko M 1:2 .....	53
Obr. 45:	Osazovací plán vrchní strany, rozměr desky 95 x 80, měřítko M 1:2 .....	53
Obr. 46:	Osazovací plán spodní strany, rozměr desky 95 x 80, měřítko M 1:2 .....	54

## SEZNAM TABULEK

Tab. 1:	Vliv koncentrace zbytkového kyslíku na teplotu přetavení pájeného spoje [13] .....	22
Tab. 2:	Některé používané bezolovnaté pájky [3]: .....	30
Tab. 3:	Výsledky pro pájecí slitinu SAC305 pro velké a malé obrazce .....	41
Tab. 4:	Výsledky pro pájecí slitinu SN100C pro velké a malé obrazce .....	42
Tab. 5:	Výsledky testu bez ochranné atmosféry roztékavosti pájky pro velké body ....	59
Tab. 6:	Výsledky testu bez ochranné atmosféry roztékavosti pájky pro malé body .....	60
Tab. 7:	Výsledky testu při zbytkovém kyslíku 5000 ppm roztékavosti pájky pro velké body .....	61
Tab. 8:	Výsledky testu při zbytkovém kyslíku 5000 ppm roztékavosti pájky pro malé body .....	62

Tab. 9:	Výsledky testu při zbytkovém kyslíku 1000 ppm roztékavosti pájky pro velké body .....	63
Tab. 10:	Výsledky testu při zbytkovém kyslíku 1000 ppm roztékavosti pájky pro malé body .....	64
Tab. 11:	Výsledky testu při zbytkovém kyslíku 500 ppm roztékavosti pájky pro velké body .....	65
Tab. 12:	Výsledky testu při zbytkovém kyslíku 500 ppm roztékavosti pájky pro malé body .....	66
Tab. 13:	Výsledky testu při zbytkovém kyslíku 200 ppm roztékavosti pájky pro velké body .....	67
Tab. 14:	Výsledky testu při zbytkovém kyslíku 200 ppm roztékavosti pájky pro malé body .....	68
Tab. 15:	Výsledky testu při zbytkovém kyslíku 100 ppm roztékavosti pájky pro velké body .....	69
Tab. 16:	Výsledky testu při zbytkovém kyslíku 100 ppm roztékavosti pájky pro malé body .....	70
Tab. 17:	Výsledky testu při zbytkovém kyslíku 50 ppm roztékavosti pájky pro velké body .....	71
Tab. 18:	Výsledky testu při zbytkovém kyslíku 50 ppm roztékavosti pájky pro malé body .....	72
Tab. 19:	Výsledky testu při zbytkovém kyslíku 20 ppm roztékavosti pájky pro velké body .....	73
Tab. 20:	Výsledky testu při zbytkovém kyslíku 20 ppm roztékavosti pájky pro malé body .....	74
Tab. 21:	Výsledky testu bez ochranné atmosféry roztékavosti pájky pro velké body....	75
Tab. 22:	Výsledky testu bez ochranné atmosféry roztékavosti pájky pro malé body.....	76
Tab. 23:	Výsledky testu při zbytkovém kyslíku 5000 ppm roztékavosti pájky pro velké body .....	77
Tab. 24:	Výsledky testu při zbytkovém kyslíku 5000 ppm roztékavosti pájky pro malé body .....	78
Tab. 25:	Výsledky testu při zbytkovém kyslíku 1000 ppm roztékavosti pájky pro velké body .....	79
Tab. 26:	Výsledky testu při zbytkovém kyslíku 1000 ppm roztékavosti pájky pro malé body .....	80
Tab. 27:	Výsledky testu při zbytkovém kyslíku 500 ppm roztékavosti pájky pro velké body .....	81
Tab. 28:	Výsledky testu při zbytkovém kyslíku 500 ppm roztékavosti pájky pro malé body .....	82
Tab. 29:	Výsledky testu při zbytkovém kyslíku 200 ppm roztékavosti pájky pro velké body .....	83
Tab. 30:	Výsledky testu při zbytkovém kyslíku 200 ppm roztékavosti pájky pro malé	

	body .....	84
Tab. 31:	Výsledky testu při zbytkovém kyslíku 100 ppm roztékavosti pájky pro velké body .....	85
Tab. 32:	Výsledky testu při zbytkovém kyslíku 100 ppm roztékavosti pájky pro malé body .....	86
Tab. 33:	Výsledky testu při zbytkovém kyslíku 50 ppm roztékavosti pájky pro velké body .....	87
Tab. 34:	Výsledky testu při zbytkovém kyslíku 50 ppm roztékavosti pájky pro malé body .....	88
Tab. 35:	Výsledky testu při zbytkovém kyslíku 20 ppm roztékavosti pájky pro velké body .....	89
Tab. 36:	Výsledky testu při zbytkovém kyslíku 20 ppm roztékavosti pájky pro malé body .....	90

## SEZNAM ROVNIC

rovnice 1:	Vyjádření termomechanického namáhání [8].....	18
rovnice 2:	Mechanické napětí ve spoji [8].....	19
rovnice 3:	Relativní prodloužení [8].....	19
rovnice 4:	Množství vzniků oxidů na kovových površích [13] .....	22
rovnice 5:	Vliv teploty na rychlost chemické reakce [13] .....	22
rovnice 6:	Rovnice pro vyhodnocení roztékavosti pájecí slitiny s aplikací výšky vrchlíku .....	38
rovnice 7:	Rovnice pro vyhodnocení roztékavosti pájecí slitiny .....	38

# ÚVOD

Pájení je proces, metalurgického spojování kovových částí roztavenou pájkou, zpravidla za přítomnosti tavidel. Dnes se jedná o důležitý technologický proces při výrobě elektronických zařízení. Z velké míry určuje životnost výrobku. Proto je důležitá jeho jakost a dlouhodobá spolehlivost i při nepříznivých podmínkách a mechanickém namáhání. [1].

Z ekologických a souvisejících normám WEEE a RoHS legislativy Evropské unie které vstoupily v platnost 1. 7. 2006 nařízení o zákazu používání některých vybraných nebezpečných látek v elektrických a elektronických zařízeních. Směrnice zakazuje nadále používat látky, převážně těžké kovy, kterými jsou Olovo, Rtuť a Šestimocný chrom. Výjimka je udělena pro vojenství, letectví, kosmonautiku a lékařské zařízení atd. [2].

Toto omezení se týká i olovnatých pájek SnPb, které byly používány od počátku pájení elektronických komponentů. Přejít na rovnocenné nové slitiny, které mají velký procentuální podíl cínu a jsou doplňovány drahými kovy, které však ovlivňují i výslednou cenu slitiny. Z tohoto důvodu je nutnost změnit technologický postup při pájení k nově používaným slitinám. Obvykle se vyznačují potřebnou vyšší teplotou pro přetavení a při pájení atmosféře s přítomností kyslíku mají vliv oxidovat a mají nižší smáčivost oproti olovnatým pájkám [3].

# 1 VÝZNAM PÁJENÍ V OCHRANNÉ ATMOSFÉŘE

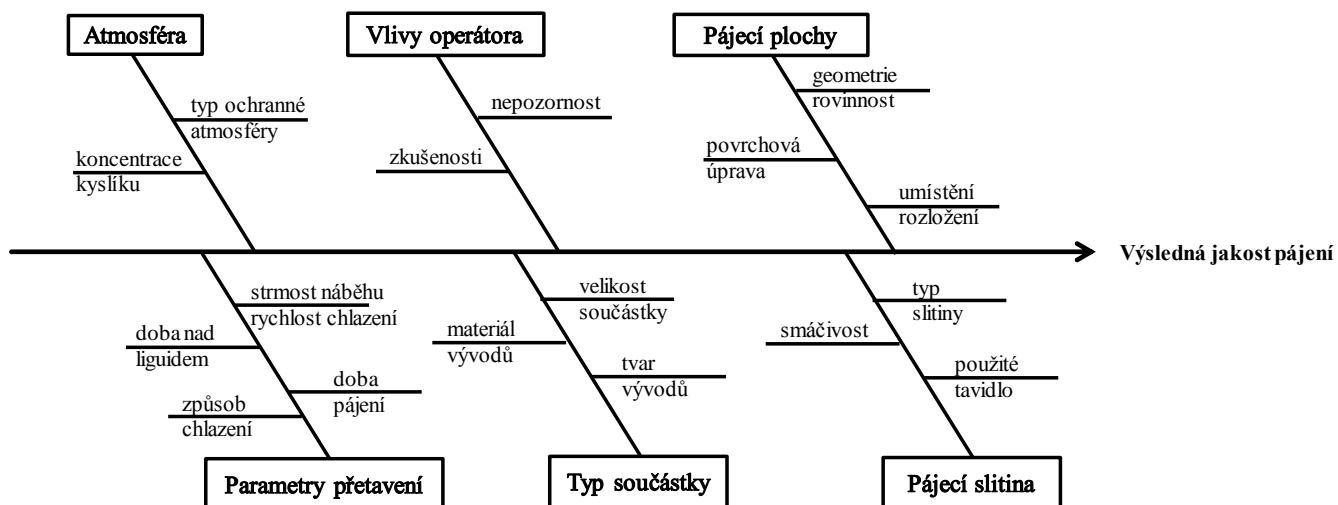
Mezi hlavní důvody pájení v ochranné atmosféře jsou snížení vad způsobených pájením při přítomnosti okolní atmosféry, v níž je obsažen kyslík, vodní páry a další relativní plyny, které se slitinou reagují a vytváří se oxidy. Dalším důvodem je snížení nutné aktivity tavidel a tím jejich úspora a následný dopad na životní prostředí. Použití bezoplachových tavidel se zrychluje proces pájení a po pájení přetavením má vyšší čistotu DPS (deska plošného spoje) bez tavidlových zbytků a pájené spoje se vyznačují vyšší jakostí.

Ochranná atmosféra použitím invertních plynů zabraňuje vzniku oxidaci na povrchu. Zvyšující teplotou spoje oxidace povrchu probíhá mnohem rychleji. Mezi další klady ochranné atmosféry se řadí pozitivní vliv na smáčení a vytváření definovanějších vzhlednějších spojů (z kosmetického hlediska). Jelikož pájecí slitina má lepší smáčivost a snižuje se její povrchové napětí. Tím se snižuje množství zkratů a nezapájených (studených) spojů, neboť probíhá lepší přenos tepla. Však zbytkový obsah kyslíku v dané ochranné atmosféře má zásadní vlivy na kvalitu pájení.

Při aktuálních potřebách průmyslu pájet desky vícekrát a několika technologiemi je důležité, aby nevznikala degradace pájecích plošek či oxidace. Využitím dusíku se mění prostředí na chemicky invertní. Dnešní době se toto stává již běžné, neboť vývojové trendy – neustálé zvyšování integrace součástek na plochu substrátu a zmenšování vývodových roztečí i ploch (tzv. Fine Pitch). [4] [5] [6].

## 1.1 Faktory působící v procesu pájení

Zachytit všechny faktory působící při procesu pájení je velice obtížné, proto ty nejzásadnější jsou uvedeny v Ishikawa diagramu Obr. 1.



Obr. 1: Ishikawa diagram pro proces pájení

Z diagramu je patrné, že na proces pájení působí řada faktorů, z nichž mezi nejvýznamnější patří následující [3]:

- Režim přetavení (teplotní)
- Geometrie pájecích ploch
- Materiál pájecích ploch
- Pájecí slitina
- Typ a provedení součástky
- Ochranná atmosféra

### **1.1.1 Tvary pájených spojů a jejich poruchy**

Mezi poruchy pájených spojů patří [10]:

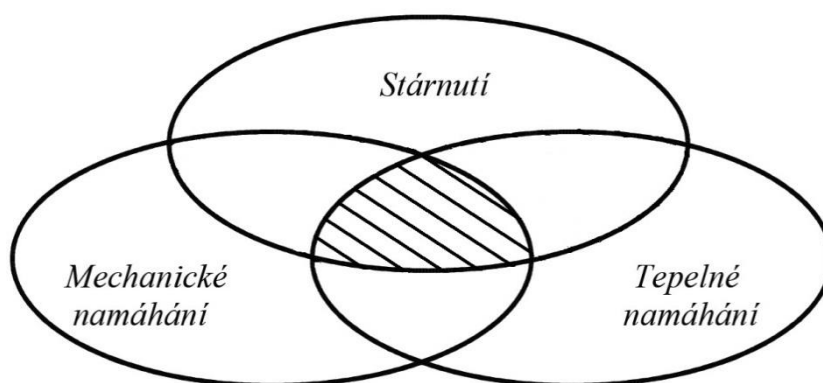
- pájecí kovové plochy bez pájky (nebyla nanesena)
- kuličkové pájky (na spoji ale i v okolí)
- rozstřík pájky
- můstky a pavučinky
- odmaččení a nesmaččení
- nedostatek popř. přebytek pájky
- matný a zrnitý spoj
- dírky v pájených spojih

## 1.2 Hodnocení jakosti v procesu pájení

Lze posuzovat z mnoha hledisek, neboť v procesu pájení působí celá řada faktorů, které se projevují při procesu (optimální teplotní profil, typ pájecí pasty, použitá tavidla, typ ochranné atmosféry a další. Ale i vlivy působící po přetavení a po celou dobu funkce pájeného spoje (např. intermetalické vrstvy nebo reagující zbytková tavidla).

Jakost pájených spojů se dá také označit životnost pájených spojů. Obecně to lze definovat za dobu, kterou je spoj schopen vykonávat požadovanou funkci.

Je patrné, že tři faktory, které spolu úzce souvisí (viz Obr. 2.) se významně podílí na životnosti spoje.



Obr. 2: Znárodnění faktorů ovlivňující životnost pájených spojů [3]

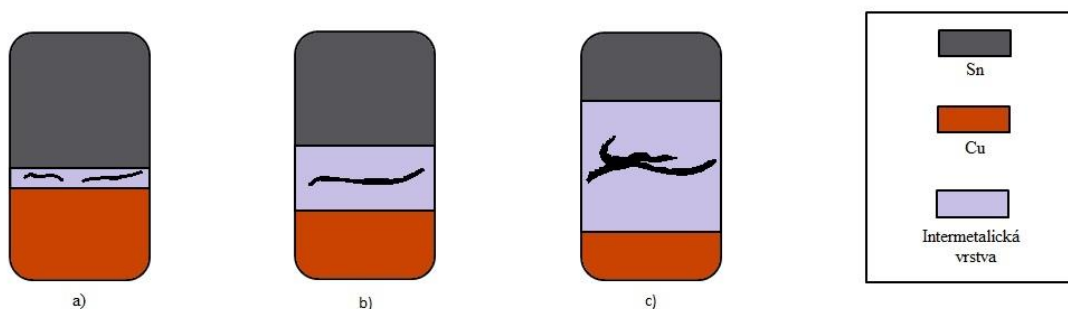
### 1.2.1 Stárnutí pájeného spoje

Pájený spoj představuje 75% pájky 15 - 20% kontaktní plocha na substrátu a 5 - 10% vývody součástky. Z těchto uvedených poměrů je patrné, že podíl na jakosti spoje může být různý. Z toho plyne nutnost se zabývat nejen pájecí slitinou, ale i všem třemi složkami, které se na tvorbě spoje podílí. [3] Tyto jednotlivé procentuální zastoupení se mohou lišit použitým typem pouzdra.

Avšak přes odlišné procentuální zastoupení jednotlivých složek je důležité se všem složkám věnovat stejnou pozornost. Pájený spoj se definuje vlastní životností. Lze definovat jakožto dobu, po niž je zaručena spolehlivá funkce spoje.

Spolehlivá funkce a vlastnosti spoje je ovlivněna degradací materiálu. Mezi toto se řadí tvorba intermetalických vrstev na rozhraní cínu a mědi (

Obr. 3). Intermetalická vrstva se vytváří u bezolovnatých slitin u pájení, je to známka správně zapájeného spoje. Ty však časem pozvolna narůstají a při působení zvýšených teplot se tento proces urychluje. Vznik takové vrstvy má za následek o zvýšení elektrického odporu a mechanické narušení.



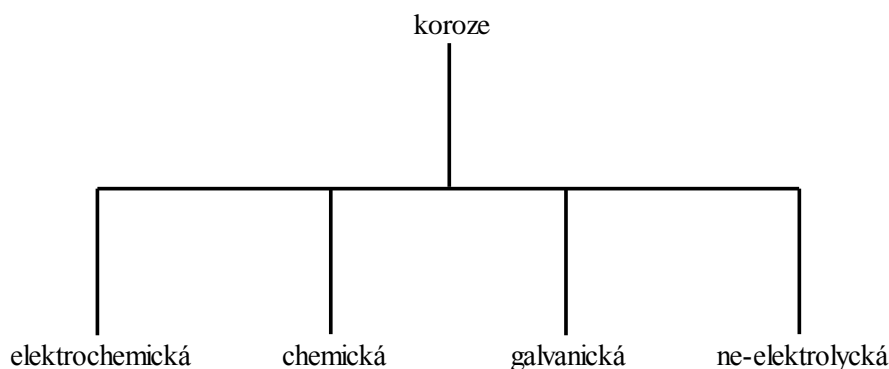
Obr. 3: Znázornění vlivů stárnutí, namáhání a destrukce i intermetalické vrstvě [7]:

- a) Ve vrstvě se objevují trhliny
- b) Vrstva roste, trhlín přibývá a zvětšují se
- c) Vrstva a trhliny jsou natolik velké, že může dojít až k nefunkčnosti

Důsledkem současných působení vlhkosti, procházející proud mohou na destrukci působit následující fyzikální a chemické děje:

- Koroze
- Migrace

Koroze se dělí na několik typů dle charakteru probíhajících dějů (Obr. 4). Má degradační vliv na mechanismus a způsobuje selhání spoje. Projevuje se vlhkostí a dalšími chemickými prvky. Atmosféře obsažený kyslík ( $O_2$ ). Z atmosférických plynů to jsou:  $CO_2$ ,  $H_2S$ ,  $SO_2$ ,  $NO_2$ ,  $Cl_2$ ,  $NH_3$  atd. Tyto sloučeniny mají sklon vytvářet ve vlhkém prostředí kyseliny, a tím chemicky narušují pájku. [7]



Obr. 4: Rozdělení koroze podle typu degradačního mechanismu

**Elektrochemická koroze** je proces, který probíhá ve vodivém prostředí, při styku dvou kovů s elektrolytem. Reakce v sobě zahrnuje dvě dílčí reakce, anodovou a katodovou, které probíhají současně. Anodová reakce odpovídá oxidaci povrchu (vlastní koroze). Katodová reakce (depolarizační) odpovídá redukci některé složky korozního prostředí nebo redukci kyslíku rozpuštěného v elektrolytu. [7]

Mezi základní faktory koroze se řadí relativní vlhkost. Pokud u spoje klesne teplota pod bod kondenzace, vodní páry kondenzují na jeho povrchu a následně jsou absorbovány. Čím je vyšší relativní vlhkost, tím je větší pravděpodobnost chemické nebo elektrochemické reakce.



Napětí má v tomto procesu také podstatnou roli. Její vznik je podmíněn přítomností vnějšího elektrického pole, jehož velikost přímo úměrně ovlivňuje její růst. [7]

**Chemická koroze** se objevuje v přítomnosti elektrolytu bez vnějšího potenciálu. Koroze může být vyvolána plyny působícími oxidačně ( $O_2$ ,  $CO_2$ ,  $SO_2$  atd.) nebo redukčně ( $H_2$ ,  $NH_3$ ,  $N_2$ , atd.). Charakteristický rys je vznik zplodin na povrchu kovu nebo slitiny. Oxidace kovů je typickým případem heterogenních reakcí (chemická reakce probíhající na rozhraní fází), neboť jde o chemickou fázi (kovu, slitiny) a fázi plynou. [7]

**Neelektrické koroze** jsou korozním prostředím látky nevodivé, či nepatrně vodivé (patří do skupiny neelektrolytů). Na povrchu kovu pokrytého neelektrolytem se často vytvářejí chemické sloučeniny s látkami, které jsou obsaženy, a které pak různě působí na povrch kovů. [7]

**Migrace** je elektrochemický proces. V kovové migraci nastává oxidace a redukce mezi dvěma spoji (kladným a záporným pólem). To je ovlivněno přítomným elektrickým polem. Ionty se v důsledku působení elektrického pole pohybují a výsledkem je růst stromečkového přemostění mezi dvěma spoji. Pokud je mezi nimi rozdílný potenciál, má to za následek zkrat v daném místě. [7]

**Elektrická migrace** je typická pro napadání spojů na rozhraní pájky a nosiče čipu v důsledku extrémně vysoké elektronové proudové hustoty proudícího z čipu přes spoj. Na rozhraní se vytváří dutina, která roste podél rozhraní.

Tento proces má za vliv spolehlivost vývodů. Poruchy jsou způsobovány hromadným přesunem kovových iontů do elektronu, což působí degradaci kovu, vakance (bodová porucha narušením krystalové mřížky – neobsažený uzel) a nakonec zkrat obvodu. Souhrnným působením se vytváří dutiny a zvyšuje se proudová hustota, která urychluje degradační proces. [7]

**Tepelná migrace** se skládá z hromadného přemísťování iontů z jedné oblasti do jiné analogický, jak elektrická migrace. S tím rozdílem, že tato je ovlivňována teplotním gradientem. [7]

### 1.2.2 Tepelné namáhání

Každý elektronický systém se vyznačuje určitou spotřebou energie a to způsobuje ztrátový výkon na součástce. Jedná se o jev změny elektrické energie na energii tepelnou. To má za následek, že každý elektrický obvod je ovlivňován teplem. Tímto projevem je zvyšování teploty na součástce a vlastní ohřev zařízení. Zdroje tepla mohou být vnější okolí ale i samotný vnitřní obvod (ztrátový výkon na polovodičích, přechodové odpory, důsledek polarizačních jevů). Změna teploty na daném komponentu či prvku má za následek vznik termomechanického namáhání pevných spojů (vznik pnutí v pájených spojkách mezi součástkami a substrátem) [8]

Elektronické součástky jsou ochlazovány přirozeným odvodem tepla. Mezi základní principy přenosu tepelné energie se řadí [8]:

- vedení (conduction)
- proudění (convection)
- záření (radiation)

Teplotní rozdíl je vyrovnáván tím, že teplo proudí z míst s vyšší teplotou do míst s nižší teplotou. U všech elektronických součástek (aktivní, pasivní) jsou zdrojem tepla.

Pokud si sousedící částice látky spolu bezprostředně vyměňují energii, jedná se o vedení tepla. Vedení tepla umožňuje nejintenzivnější přenos tepelné energie. Tento jev nastává i mezi vývody součástky, pájecí slitinou a substrátem.

Dalším způsobem je proudění. K tomuto dochází, když částice mění v prostoru svoji polohu a unášejí i vlastní energii. Přírozené proudění převážně vzniká u kapalin a plynů. Mezi nucené lze zařadit přenos tepla vnějšími silami (např. ventilátor nebo turbína v chladicím zařízení).

Třetím způsobem je šíření tepla zářením. To se přenáší elektromagnetickým zářením mezi dvěma tělesy, pokud je mezi nimi podstatně rozdílná teplota.

U termomechanického namáhání obecně platí, že při změně teploty dochází ke změně rozměrů materiálu. Obecně dochází tomu, že při zvýšení teploty se materiál roztáhne (prodlouží) a při chlazení dochází k jeho smrštění (zkrácení). Mírou teplotní závislosti délkových rozměrů pevného tělesa je teplotní součinitel délkové roztažnosti  $\alpha$  ( $K^{-1}; ^\circ C^{-1}$ ), v anglické literatuře označování TCE (rovnice 1) (Temperature Coefficient of Expansion) definovaný vztahem: [8]

$$\alpha, TCE = \frac{\Delta l}{l_0} * \frac{1}{\Delta T} \quad (1)$$

$\Delta l$  je změna délky (m)

$l_0$  je změna tělesa při  $^\circ C$  (m)

$\Delta T$  je změna teploty ( $K^{-1}; ^\circ C^{-1}$ )

rovnice 1: Vyjádření termomechanického namáhání [8]

Termomechanické namáhání vznikající při spojování různých materiálu se značně rozdílnými teplotními součiniteli, se stává vážným problémem. Příklad jsou spojení holých polovodičových čipů na organický substrát s jiným TCE. Nebo u pájeného spoje součástky se substrátem.

### 1.2.3 Mechanické namáhání

Mechanické namáhání způsobuje únavu materiálu pájeného spoje. Ta se následně projevuje snížením jeho mechanických vlastností a následným mechanickým narušením.

**Mechanické namáhání se rozlišuje dvou typu [3]:**

- Externí – působení vnějších sil na spoj, např. vibrace
- Interní – namáhání spoje v důsledku změn vnitřních poměrů

Spojením dvou různých pevných materiálu s rozdílnými koeficienty TCE. Při změně jejich teplot má za následek vzniku mechanického namáhání (v tahu i ve smyku resp. střihu) působícího na spoj.

Jedná se zejména o mechanické namáhání vývodu součástek a substrátu. Tato skutečnost je způsobena rozdílnými TCE koeficienty. To však může vést ke vzniku prasklin a dalšímu nárůstu v místě spoje nebo v okrajových částech spoje substrátu či

součástky. Tyto spoje mohou okamžitě nebo za určitý čas způsobit nefunkčnost obvodu. Mechanické napětí ve spoji je definováno (rovnice 2) [8]

$$\sigma = E * \varepsilon = E * \frac{\Delta l}{l} \quad (2)$$

$\sigma$  je mechanické napětí ve spoji ( $\text{N} \cdot \text{m}^{-2}$ )  
 $E$  je Youngův modul pružnosti v tahu ( $\text{N} \cdot \text{m}^{-2}$ )  
 $\varepsilon$  je poměrné prodloužení (-)

rovnice 2: Mechanické napětí ve spoji [8]

Poměrné prodloužení působící na spoj lze vyjádřit rozdílem změn délek spojených materiálů. Pro relativní prodloužení platí (rovnice 3)

$$\varepsilon = (TCE_C - TCE_S) * \Delta T \quad (3)$$

$\varepsilon$  poměrné prodloužení  
 $TCE_C$  je teplotní součinitel délkové roztažnosti součástky  
 $TCE_S$  je teplotní součinitel délkové roztažnosti součástky  
 $\Delta T = T_2 - T_1$   $T_2$  je teplota tuhnutí a  $T_1$  je pracovní teplota

rovnice 3: Relativní prodloužení [8]

Mechanické namáhání, způsobuje velké množství na sobě nezávislých faktorů. Některé vlivy je možno ovlivnit vhodnou geometrií spoje a zvoleným typem pájecí slitiny. Pružný drátový vývod redukuje pnutí ve spoji oproti stejnému SMD vývodu pouzdra.

Daná problematika je popsána v normách ČSN EN 62137 – 1 - (1 - 5) Kde používané jsou různé testovací metody dle normy. Jsou děleny na dané typy pouzder. Mechanického namáhání v tahu, smyku a cyklického ohýbání materiálu. [9]

### 1.3 Pájení v dusíkové atmosféře

Použití ochranné atmosféry v procesu zamezuje přístupu kyslíku a dalších reaktivních plynů a vzdušné vlhkosti. To při skladování, ale i samotném procesu pájení, neboť při vysoké teplotě má rychlejší projev oxidací na povrchu pájených ploch, ale i samotné pájce. Tímto lze použít ochrannou atmosféru tvořenou inertními medii, jenž zamezí přístupu vzduchu.

Nejčastěji používaným a nejdostupnějším plynem je dusík. Ostatní vzácné plyny Argon a další se z ekonomických důvodů nepoužívají. Dusík ( $N_2$ ) je bezbarvý plyn bez příchuti a zápachu. Jehož teplota tání je  $-210,5\text{ }^{\circ}\text{C}$  a bod varu  $-195\text{ }^{\circ}\text{C}$  (při normálním tlaku). Pokud je do procesu dodáván tekutý dusík, který je těžší než vzduch a z tohoto důvodu se může hromadit v nízko položených místech. Dusík tvoří 78% atmosféry a lze ho získávat více způsoby. Přes membránové generátory, absorpce přes molekulová síta a generátory dusíku. Výrobci těchto zařízení uvádí čistotu od 95% až tzv. 6-ti devítkovou čistotu tj. 99,9999.

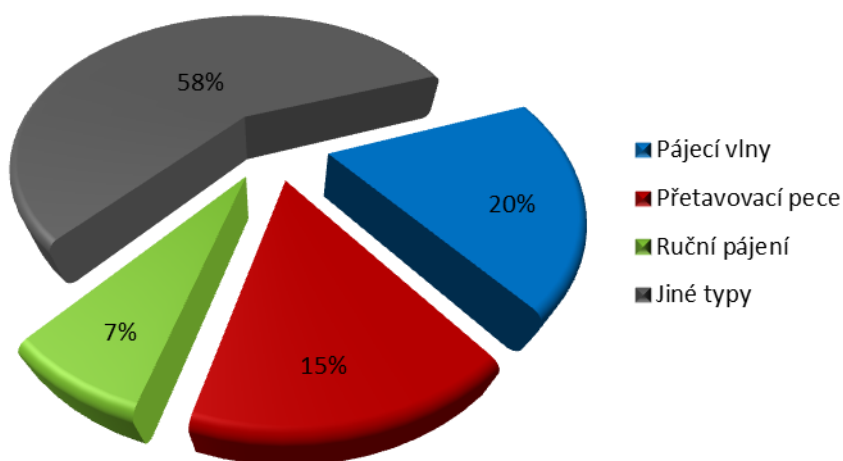
V průmyslu je vyžadována vysoká čistota ( $<500\text{ppm}$ ), pro tyto účely je vhodné použít tekutý dusík (nazývaný kryogenní – vzniklý podcházením a následným zkapalněním).

Aktuálním světovým výzkumem v této problematice bylo zjištěno, že roztékavost pájky je závislá na zbytkovém kyslíku v ochranné atmosféře. Roztékavost pájky začíná při nižších teplotách, pokud snižujeme i úroveň zbytkového kyslíku, pozitivně se i s tím snižuje úroveň oxidace pájených spojů. [6] [7]

V celosvětovém měřítku je použití dusíku odhadováno na následující [11]:

- Pájecí vlny do 20%
- Přetavovací pece do 15%
- Ruční pájení do 7%

V celkově zastoupených jednotlivých procesech pájení je vyobrazeno v (Obr. 5):



Obr. 5: Celosvětové měřítko použití dusíku pro bezolovnaté pájení

### 1.3.1 Charakteristické rysy pájení v ochranné atmosféře

Při pájení na vzduchu dochází k oxidační reakci mezi různými částmi vznikajícího pájeného spoje, kterými jsou:

- pájecí plošky na DPS, pokovené otvory, nepájivá maska, ale i vlastní substrát
- vývody součástky a také její pouzdro
- pájka

Oxidační reakce probíhá ze vzduchu, z vody, z oxidu uhelnatého a uhlíčitého. Omezení oxidačního procesu lze provést pomocí invertní atmosféry (dusík, argon) nebo ustavením rovnováhy mezi oxidační a redukční reakcí (vodíková atmosféra) [10]

Přítomností dusíku během pájení chrání kovové povrchy před oxidací. Povrchové napětí roztavené pájky je nižší v dusíkové atmosféře, než na vzduchu. Výrazně redukuje tvorbu oxidů na pájeném spoji. Vede ke snížení defektů a vznikají reprodukovatelnější a kvalitnější spoje. Tím se výrazně redukuje množství zkratů.

U procesu pájení je nutností volit aktivitu a množství tavidla v pájecí pastě. V dusíkové atmosféře se organické složky z pájecí pasty uvolňují lépe. Nevzniká ani mnoho reziduí (uvádí se snížení o 60%), jelikož se lépe odpařují a zbylé se dají lépe čistit, neboť nejsou oxidované. [1]

Dusíková atmosféra se užívá převážně v kombinaci s bezoplachovými ("no clean") tavidly. Tím se eliminuje následné dočistění DPS po pájecím procesu. Neboť tavidla z hlediska spolehlivosti pájeného spoje vnášejí náhodné vlivy. Úspory vznikají ve spotřebě pájky – snížení o 30 až 50% a ve zlepšené kvalitě pájeného spoje (vyšší povrchové napětí, méně můstků). [10]

Výhody dusíkové atmosféry [10] [12]

- Větší flexibilita procesu – větší technologické okno
- Ochrana pájecí slitiny před oxidací
- Snížení povrchového napětí bezolovnatých pájek
- Minimální vliv rychlosti proudění  $N_2$  na pájitelnost
- Kladný vliv dusíkové atmosféry na menší vzdálenosti pájecích vývodů
- Definovanější a vzhlednější pájené spoje (z kosmetického hlediska)
- Redukce použití tavidel pro ekvivalentní smáčivost spoje
- Omezení tvoření zkratů a nezapájených (studených) spojů

Nevýhody procesu:

- Výroba a spotřeba dusíku
- Vyšší pořizovací náklady

Zavedením ochranné dusíkové atmosféry ovlivňujeme pájecí proces chemicky a fyzikálně. Vzniká vzájemná interakce tavidla a ochranné atmosféry. Primárním důvodem je i odstranění nežádoucích látek a následný vznik oxidu na površích pájeného spoje.

Množství vzniku oxidů na kovových površích vyjadřuje rovnice 4:

$$\frac{m}{A} = k * \sqrt{t} \quad (4)$$

m	hmotnost oxidů (kg)
A	plocha oxidů (m <sup>2</sup> )
t	doba růstu koeficientů (s)
k	růstový koeficient vycházející z Arrheniovy rovnice

rovnice 4: Množství vzniků oxidů na kovových površích [13]

$$k = k_0 * \exp\left(-\frac{B}{T}\right) \quad (5)$$

k	představuje nový růstový koeficient
k <sub>0</sub>	reprezentuje koeficient rozšiřování (1,6*10 <sup>2</sup> kg*m <sup>-2</sup> )
B	aktivační energie (J*mol <sup>-1</sup> )
T	teplota (K)

rovnice 5: Vliv teploty na rychlost chemické reakce [13]

Z výše popsaných rovnic je patrné, že růst oxidačních vrstev silně urychluje vzrůstající teplota. Rychlost růstu také ovlivňuje použitá povrchová úprava pájeného spoje.

Cín reaguje mnohem lépe s atmosférickým kyslíkem (tvorba oxidů), než pokud je užitá povrchová úprava. Z tohoto důvodu bezolovnaté slitiny s vysokým podílem cínu vykazují horší smáčecí charakteristiky ve vzduchové atmosféře. Použitím pájecí pasty, které mají menší poloměry zrnitosti, a proto mohou vykazovat lepší chování v invertních atmosférách a lepší smáčecí charakteristiky, při použití v ochranné dusíkové atmosféře.

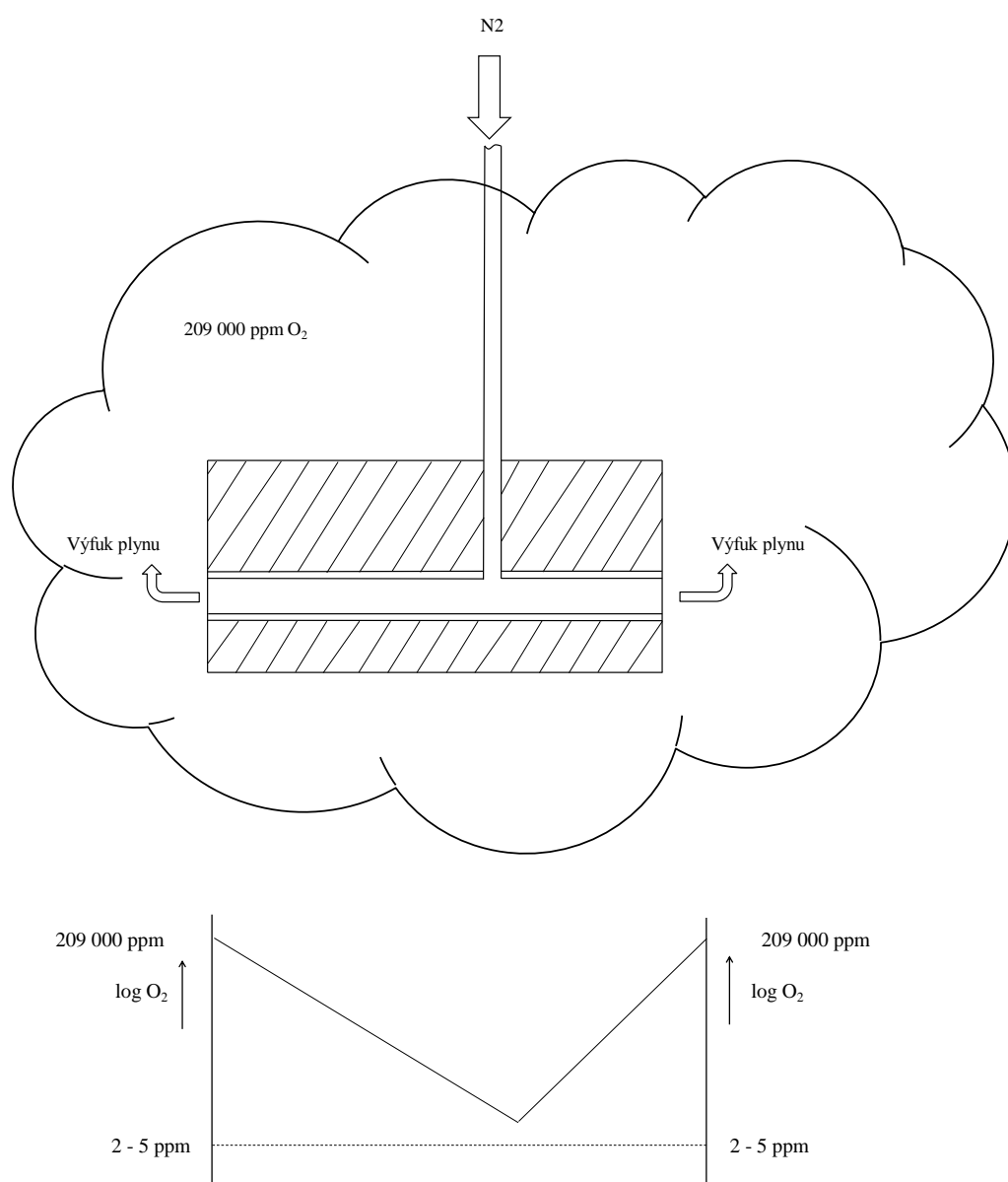
Dusík snižuje povrchové napětí a tím i zlepšuje smáčecí charakteristiky. Povrchové napětí je redukováno v závislosti na zbytkové koncentraci kyslíku. Optimální zbytková koncentrace by se měla pohybovat od < 100 ppm do 1000 ppm. Však ideální koncentraci nelze stanovit, neboť je závislá na mnoha faktorech, proto je množství zbytkového kyslíku potřeba optimalizovat daným potřebám produktu. Vliv zbytkové koncentrace kyslíku na teplotu pájky, stupeň přehřátí, při níž se začne roztékat, je uvedeno v Tab. 1 [13]:

Tab. 1: Vliv koncentrace zbytkového kyslíku na teplotu přetavení pájeného spoje [13]

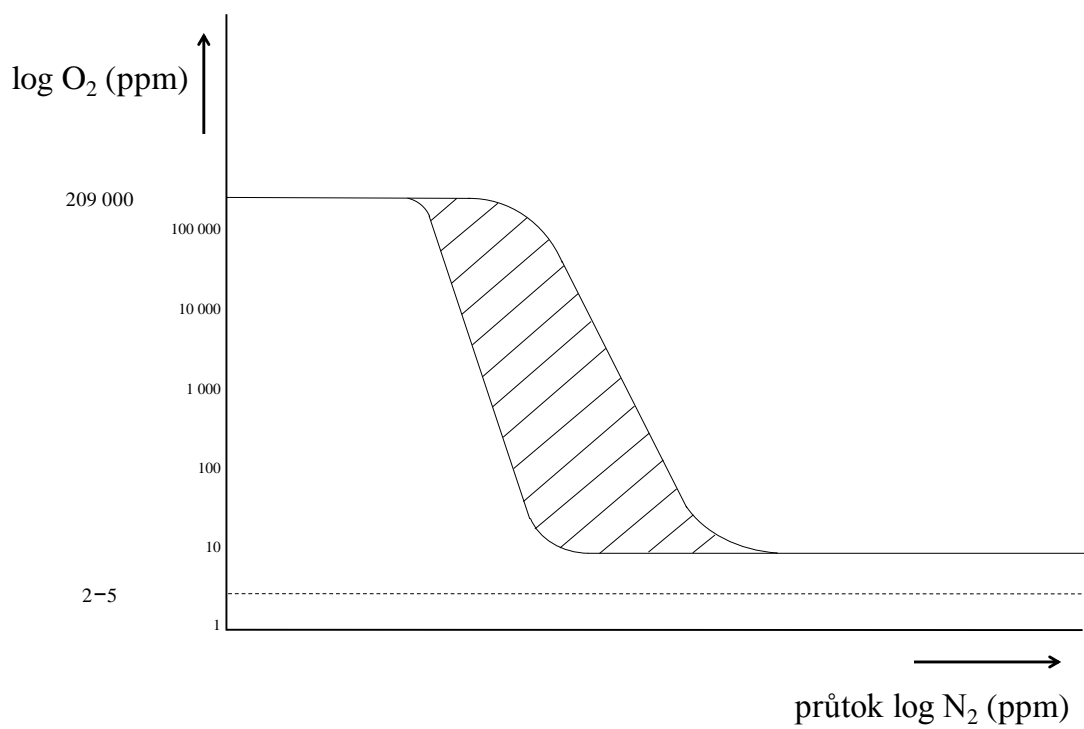
Pájecí slitina	Bod přetavení (°C)	Koncentrace zbytkového kyslíku (ppm)		
		10	100	1000
		Teplota při které se začne pájka roztékat (°C)		
Sn96,5Ag3,5	221	230	238	240
Sn99,3Cu0,7	227	230	234	245
Sn95Sb5	240	246	255	258

### 1.3.2 Ochranná atmosféra při pájení přetavením

Požadavky na pájení přetavením v ochranné atmosféře se poněkud liší od požadavků pro pájení na vlně. Obecně platné výhody se příliš neliší, avšak mechanismus vzniku pájeného spoje není totožný. Roztavená pájka není na pájený substrát mechanicky vrhána, ale musí dojít ke vztlínání pájky, která se nachází pod součástkou ve formě pasty, jejíž součástí je i tavidlo. Proto při pájení přetavením není obvykle nutná tak nízká koncentrace kyslíku, jako je tomu u pájení na vlně. Přesto je třeba, co nejpřesněji stanovit velikost koncentrace, neboť v procesu působí řada proměnných, navíc prostor pájení nelze zcela oddělit od okolní atmosféry (Obr. 6). Tím i koncentrace v daném místě v peci (Obr. 7).



Obr. 6: Schématické znázornění pájecí pece a rozložení koncentrace dusíku v prostoru pece



Obr. 7: Koncentrace dusíku v peci



## 2 POVRCHOVÁ ÚPRAVA PÁJENÝCH PLOCH

Povrchová úprava pájecích ploch má význam při ochraně povrchu, zabraňuje se jeho oxidování, a tím se prodlužuje i možnost skladování před pájením. Mezi další kladné vlivy se řadí rychlejší přenos tepla a zkvalitnění následného zapájení součástek zlepšením smáčivosti pájky. To však může i výrazně prodloužit skladovatelnost od výroby desky po finální pájení. Další nedílnou součástí je množství oprav, poruchovost a tím i celý výnos z procesu.

Na trhu je veliké množství povrchových úprav a ty se liší cenou (dle užití úpravy výrazně ovlivňuje výslednou cenu DPS), ale i technologií výroby a v neposlední řadě použitými materiály. Toto určuje typické oblasti použití a předurčuje pro požadované umístění aplikace (medicínské aplikace, letectví, telekomunikace, spotřební elektronika a testovací zařízení). Neexistuje jedna optimální povrchová úprava, ale dle aplikace musí volit optimální s ohledem na výslednou cenu, spolehlivost. Nedílnou součástí je i případná indispozice možnosti kontaktování čipů či možnosti po jakou maximální složitost navržených desek to lze použít. Rovinnost povrchu a nejmenší možné rozlišení mezi pájecí plochou a mezerou.

Všeobecné požadavky na volbu povrchové úpravy DPS [10] [14]:

### Materiálová komptabilita

- Chemicko-fyzikální komptabilita (smáčivost povrchů, slučitelnost s působením různých tavidel i ochranné atmosféry)
- Komptabilita s nepájivou maskou

### Procesní komptabilita

- Rovinnost povrchu
- Tloušťka vrstvy 0,1 – až desítky  $\mu\text{m}$
- Vhodnost pro fine pitch aplikace
- Možnost kontaktování
- Malý teplotní stres DPS
- Dlouhodobá skladovatelnost i spolehlivost

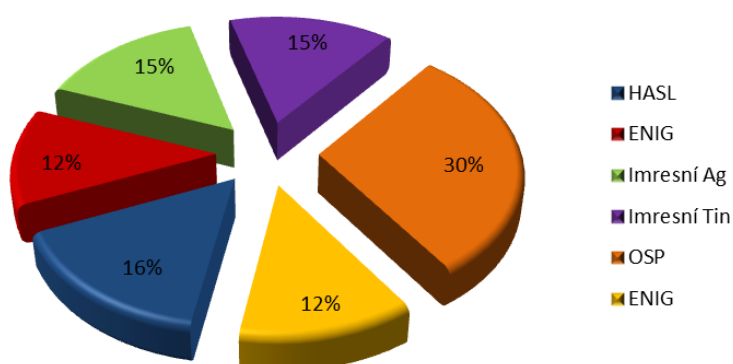
### Environmentální komptabilita

- Netoxická povrchová úprava
- Ekologické zpracování odpadních vod
- Koplanarita s environmentálními vlivy (migrace stříbra, růst intermetalických vrstev, růst whiskerů)

## 2.1 Používané povrchy a povrchové úpravy

V montážních mikroelektronických technologiích rozlišujeme dva základní typy substrátů, organické desky plošných spojů a anorganické korundové podložky. Výhodou anorganických substrátů používaných pro vrstvé technologie je s ohledem na materiál vodivých ploch, kterými jsou většinou drahé kovy a jejich směsi (Ag, AgPd, AgPt, Au), dobrá pájitelnost, a s tím i zajištění vysoké spolehlivosti pájených spojů. Poněkud horší je situace u organických substrátů, kde je vodivým materiálem měď (Cu). Ta má velmi silné oxidační schopnosti, a proto je zde nutné provádět před pájením povrchové úpravy, které jsou popsány dále.

V celosvětovém měřítku v roce 2007 byly jednotlivé povrchové úpravy zastoupeny v jednotlivé ploše na desce v tomto měřítku Obr. 8:



Obr. 8: Tržní podíl použití povrchových úprav v roce 2007 [14]

### 2.1.1 HASL (Hot Air Solder Leveling)

HASL – jedná se o nanesení roztavené cínové pájky ponořením desky do cínové lázně, poté probíhá následné vyrovnaní povrchu horkým proudem vzduchu. Ale při nanášení roztavené pájky různé materiály různě odolávají teplotnímu šoku, proto není vhodný pro tenké desky (menší než 0,4mm). Z tohoto důvodu se po procesu mohou projevit nepatrné deformace desek. V dnešní době se již využívá jen bezolovnaté slitiny, které vyhovují normě RoHS. Je však možné použít olovnatou slitinu pro aplikace, které mají udělenou výjimku. Z předností jsou ty, že se jedná o průmyslově zavedený technologický proces z tohoto důvodu je i levný. Tloušťka vrstvy je větší než 5μm.

#### Výhody

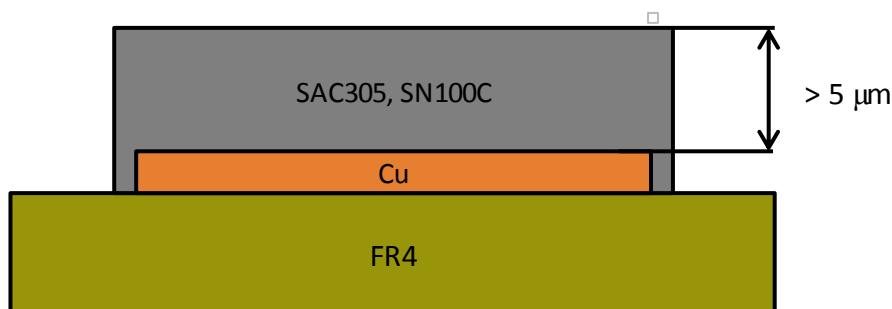
- Výborná pájitelnost
- Skladovatelnost až 12 měsíců
- Vícenásobné pájecí cykly DPS až 5x

#### Nevýhody

- Reliéfní pájecí plochy rozdílů 1 - 20 μm
- Možnost vzniků mikro zkratů u desek bez ochranné nepájivé masky

Vhodné úpravy pro standartní SMD (Surface Mount Devices). Z důvodu nedokonalé rovinnosti pájecích plošek se povrchová úprava nehodí pro pájení součástek s malou roztečí (Fine Pitch), kde se obecně jedná o pouzdra  $\mu$ BGA...atd. Rovněž není vhodná pro kontaktování polovodičových čipů. Nyní již tento proces začíná zastarávat z důvodu náročné energetické spotřeby, také z důvodu vzniku velkého množství zplodin (tento proces je neekologický)[10] [15] [16] [17] [18]

Obr. 9: HASL (Hot Air Solder Leveling)



### 2.1.2 OSP (Organic Surface Protectives)

OSP – je založen na chemicky nanesených organických inhibitorech, oxidace mědi na měděný povrch. Často používané látky na bázi benzoimidazonů. Vrstvy jsou fixovány na povrch slabými Van der Waalsovými silami [10]. Nejčastěji je tato metoda využívána pro jednostranné desky, ale lze je užít i na vícevrstvé desky. Tloušťka vrstvy je 0,15 - 0,30  $\mu$ m.

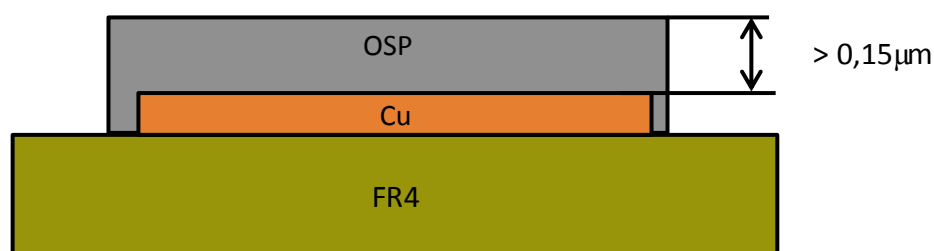
Výhody

- Nízké náklady na výrobu
- Možnost jemné kresby vodičů mezera/čára 0,2/0,2 mm

Nevýhody

- Snížená pájitelnost
- Krátká doba skladovatelnosti maximálně 6 měsíců

Vhodné pro fine pitch aplikace a SMD. Důležité je vyhnout se jakýmkoliv otiskům prstů na povrchu. Rychlý vznik oxidace absence kontaktování na tuto vrstvu [10] [17] [19]



Obr. 10: OSP (Organic Surface Protectives)

### 2.1.3 ENIG (Elektroness Nickel Immersion Gold)

Metoda je preferovaná pro náročné aplikace. Galvanická metoda nanášení vrstvy niklu a poté vrstvy zlata na povrch desky. Nejprve se chemicky nanese vrstva niklu ( $3 - 6 \mu\text{m}$ ) a poté na tuto vrstvu nanese zlato ( $0,025 - 0,1 \mu\text{m}$ )

#### Výhody

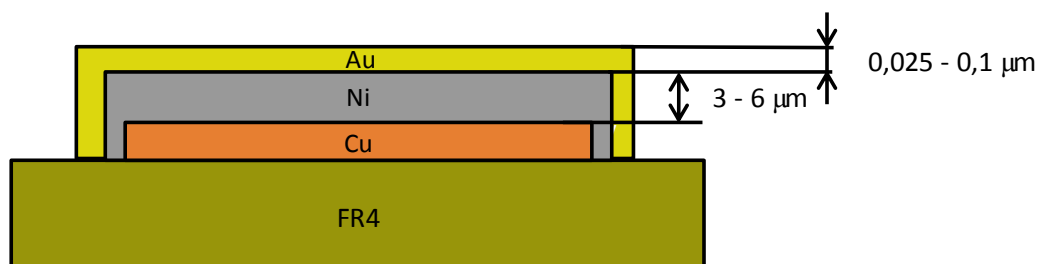
- Rovinnost povrchu
- Skladovatelnost až 12 měsíců a dlouhodobá stabilita v čase
- Vícenásobné pájecí cykly DPS až 5x

#### Nevýhody

- Ekonomická náročnost procesu
- Black Pad (černá kontaktní ploška)

Další výhoda je, že vzniká rychlý přechod tepla. Kvůli difundaci mědi do zlata je nutné jej oddělit niklovou vrstvou. Pájení vyšší teplotou, a tím i vyšší nároky na teplotní odolnost součástek. Struktura niklu zajišťuje maximální korozivní odolností a tím i zajišťuje velice kvalitní pájený spoj. Tato úprava se hodí pro Fine Pitch aplikace a SMD pájené spoje vynikají dobrou smáčivostí pájky.

Lze na tuto úpravu kontaktovat hliníkový drát pro vrstvu zlata  $10 - 25 \mu\text{m}$ . Nevýhoda je při vzniku poruch tzv. Black Pad (černá kontaktní ploška), při níž se oddělí pájený spoj od vrstvy niklu. [15] [17] [18] [20] [21]



Obr. 11: ENIG (Elektroness Nickel Immersion Gold)

### 2.1.4 ENEPIG (Electroless Nickel Electroless Palladium Immersion Gold)

Používá se pro nejnáročnější aplikace a pro připojování holých čipů. Má extrémně plochou desku a velmi dobré oxidační vlastnosti. Vrstva se vytváří nejprve nanesením niklu  $3-8 \mu\text{m}$  následně Paládium  $0,05-0,15 \mu\text{m}$  a zlato  $0,05-0,1 \mu\text{m}$ .

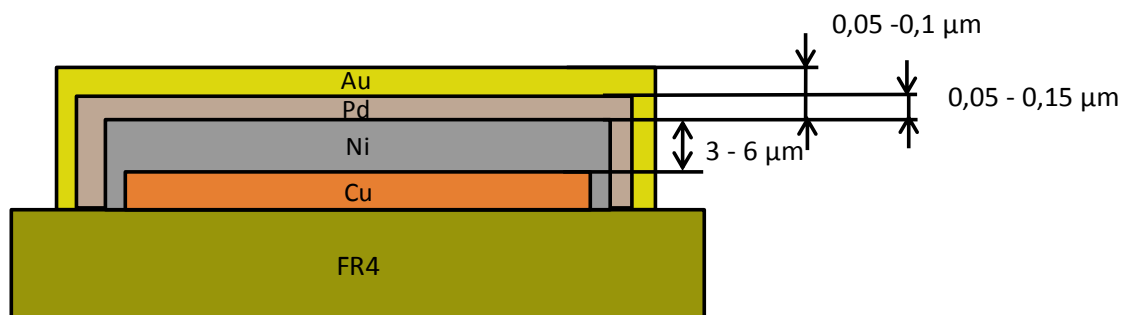
#### Výhody

- Rovinnost povrchu
- Skladovatelnost až 12 měsíců

#### Nevýhody

- Ekonomická náročnost procesu
- Black Pad

Úprava má nejširší využití pro celou řadu aplikací, někdy označovaná jako univerzální provedení. Lze na tuto vrstvu kontaktovat hliníkové i zlaté drátky. Vhodná pro Fine Pitch aplikace a SMD. Má dobré smáčecí charakteristiky. Mezi nevýhody se řadí to, že nikl tlumí vysokofrekvenční obvody. [18] [21]



Obr. 12: ENEPIG (Electroless Nickel Electroless Palladium Immersion Gold)

### 2.1.5 Imersní cín (Immersion Tin)

Přímo na povrch se nanáší vrstva cínu. Inverzní povrchy jsou vylučované chemickou cestou. Imersní cín je slučitelný s cínem obsažený v pájce. Tloušťka chemického cínu je menší než 1 µm.

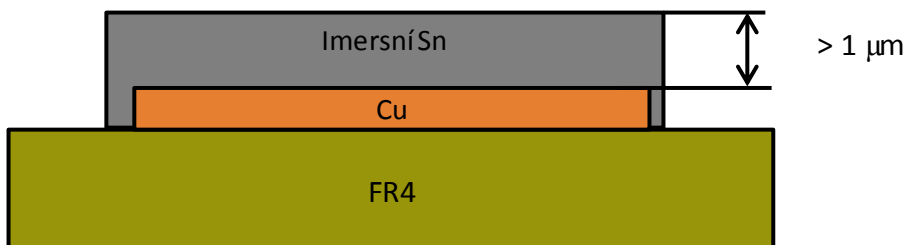
#### Výhody

- Rovinnost povrchu
- Nízké ekonomické náklady

#### Nevýhody

- Horší pájitelnost maximálně dva cykly
- Křehkost pájky
- Skladovatelnost 3. až 6. měsíců

Jelikož k nízké provozní teplotě se omezuje křovitost a roztažnost materiálu. Pájka je velmi citlivá na pot a nečistoty. Z tohoto důvodu se doporučuje speciální zacházení. [17] [18] [20]



Obr. 13: Imersní cín (Immersion Tin)

### 3 BEZOLOVNATÉ PÁJKY

Snaha o náhradu olovnatých pájecích slitin Sn63Pb37 z důvodu toxicity na lidský organismus a přírodní prostředí a dále pevnost pájených spojů.

Nevýhody bezolovnatých pájek spočívají ve vyšší pořizovací ceně a vyšší teplotě tavení, neboť pro tyto pájky je převážné ve většině slitin nutná přítomnost minimálně 60% Sn a zbytek je doplňován drahými a vzácnými kovy.

Tyto pájky mají větší tendenci k oxidaci z tohoto důvodu je nutno při pájení použití ochranné atmosféry. V dusíkové vynikají i lepšími smáčecími charakteristikami oproti klasické pájce s obsahem olova. Zatímco SnPb pájky dosahují tekutého stavu při teplotě 183°C, u převážné většiny bezolovnatých pájek je tento stav dosažitelný v rozmezí teplot 195 - 227°C, v závislosti na složení viz Tab. 2. [10]

Bezolovnaté slitiny musí vyhovovat těmto požadavkům [10]:

- Kompatibilita s používanými zařízeními i postupy
- Ekvivalentní nebo lepší materiálové charakteristiky než stávající slitiny
- Teplota tavení >185°C
- Minimální rozsah plastického stavu optimálně 4 - 15°

Tab. 2: Některé používané bezolovnaté pájky [3]:

Teplota tavení (°C)	Pájka	Využití v průmyslu
<b>Slitiny s vysokým bodem tavení &gt;210°C</b>		
227	Sn/Cu	spotřebitelský a telekomunikace
221	Sn/Ag	
217	Sn/Ag/Cu	automobilový a telekomunikace
	Sn/In/Cu/Sb	
	Sn/In/Ag	
	Sn/Ag/Cu/Zn	
	Sn/Ag/Bi/Cu Sn/Ag/Bi/Cu/Ge	vojenský/letecký spotřebitelský
<b>Slitiny s vysokým bodem tavení 180-210°C</b>		
206 -213	Sn/Ag/Bi/X	spotřebitelský
	Sn/Ag/Bi	vojenský/letecký a spotřebitelský
199	Sn/Zn	spotřebitelský
<b>Slitiny s nízkým bodem tavení &lt;180°C</b>		
	Sn/Bi/Zn	
138	Sn/Bi	

### 3.1 Prvky pájecích slitin

Používání slitin zlepšuje mechanické, tepelné a elektrické vlastnosti slitin. Jednotlivé prvky mohou výrazně ovlivnit mikrostrukturu spoje. Výpis používaných příměsí dle literatury [1] [10]:

**Měď (Cu)** – jedná se o jeden z nejvíce využívaných materiálů v elektrotechnice. Je využívána také pro materiály vodičů. Vyznačuje se dobrou smáčivostí povrchu i mechanickou pevností. Ale má však tendenci se rozpouštět ve slitinách pájek a vytvářet dvě ortorombické intermetalické sloučeniny. Kontaminace vede k větší zrnitosti i viskozitě.

**Cín (Sn)** – tento prvek tvoří všechny pájky a jedná se o základní materiál, do níž jsou přidávány další slitiny, aby se dosáhlo potřebných mechanických a elektrických vlastností s ohledem na teplotu tání. Má dobré tepelné i elektrické vlastnosti. Nevýhodou je nízká mechanická pevnost v střihu a tahu. Toto je zvyšováno dalšími příměsemi. Nevýhoda cínových slitin je rozpustnost mědi z pájeného spoje a tím možné následné zeslabování.

**Bismut (Bi)** – příměs tohoto prvku značně mění teplotu tavení slitiny, ve které je zastoupena. Získává se jako produkt při čištění olova, když bude snížena spotřeba olova, bude snižována i produkce Bismutu. Proto se pro využití v budoucích aplikacích nelze příliš počítat. Zlepšuje smáčecí charakteristiky výsledné slitiny.

**Stříbro (Ag)** – jedná se o stálý kov, kde jeho hlavní nevýhodou je vysoká cena. Mezi jeho hlavní výhody se řadí dobré elektrické vlastnosti. Způsobuje zrnitost a důlky v povrchu pájky.

**Indium (In)** – Prvek využívaný pro snížení bodu tání slitiny. Jeho teplota tavení je 165°C. Ve slitinách s cínem, popř. s dalšími prvky, tvoří indium kompozici, která má teplotu tavení nižší než 100°C.

Mezi nejrozšířenější pájecí slitiny dnes patří především dva typy, SAC 305 a SN100C.

#### 3.1.1 Pájka SAC305 (Sn96.5/Ag3.0/Cu0.5)

SAC305 je bezolovnatá slitina, která obsahuje 96,5% cínu, 3% stříbra a 0,5% mědi. Má nízký bod tavení (217 - 218°C) a je slučitelná se všemi typy tavidel. Vykazuje vynikající spolehlivost pájeného spoje a odolnost vůči únavě.

Jedná se o blízkou náhradu za slitinu 63Sn/37Pb. Daná slitina prokázala velmi dobrou funkci v SMT aplikacích. Při použití pájení vlnou produkuje méně strusky. SAC slitiny mají výrazně větší povrchovou energii ve srovnání s olovnatými slitinami. To má však za následek rozdílné smáčení kovových povrchů. Tento fyzikální nedostatek je koriguje zvýšením teploty a časem pájení, když lze takto zlepšit proces pájení. [10] [22]

#### 3.1.2 Pájka SN100C (Sn99,3/Cu0,7/Ni0,04/Ge0,01)

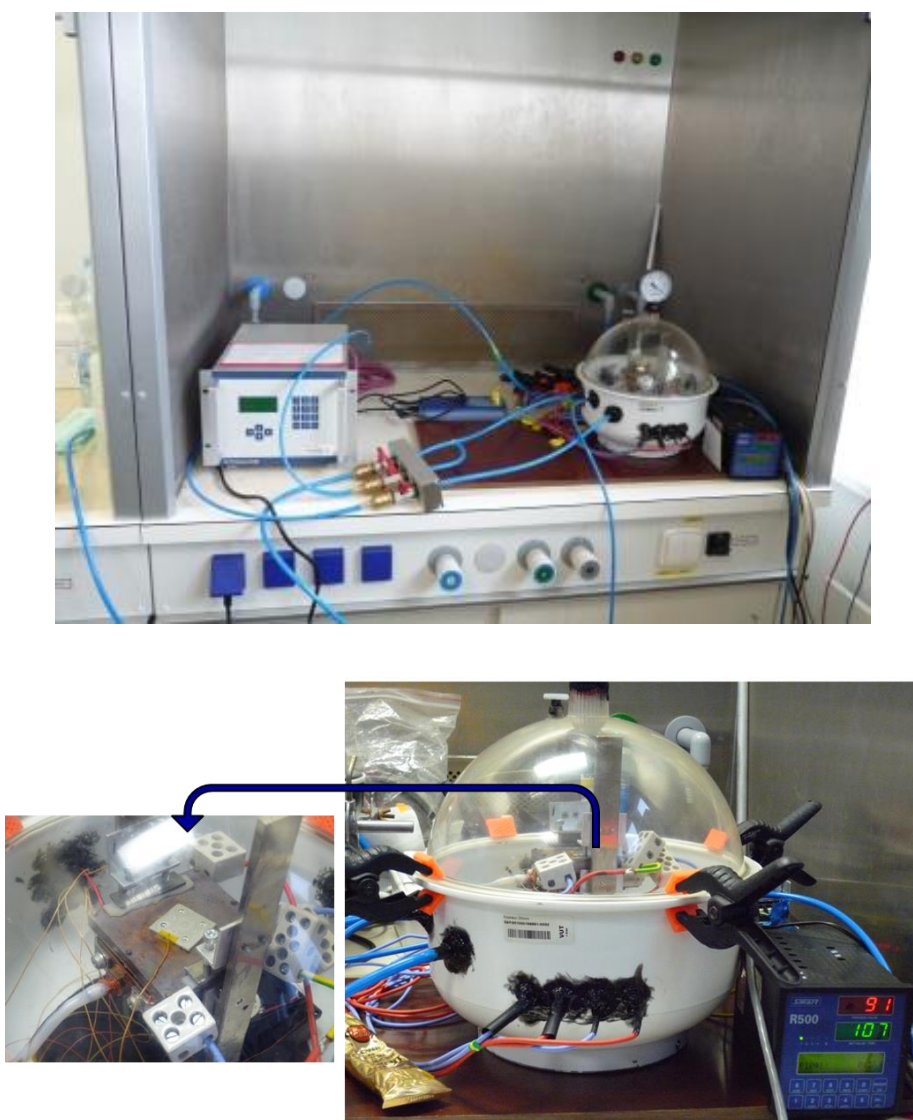
SN 100C je bezolovnatá slitina eutektického složení vyvinuta firmou Nihon Sueprior v Japonsku. Má vyšší teplotu tavení 227°C. Neobsahuje stříbro ani bismut. Tato slitina se osvědčila v komerční výrobě již od roku 1991. Vytváří hladké lesklé spoje. Při pájení nevytváří můstky a rampouchy.

Je odolná vůči tepelné únavě a má mez tečení srovnatelný olovnatým slitinám. [10] [22] [23]

## 4 EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST

Navržený postup pro zjišťování vlastností pájecí pasty v ochranné atmosféře spočívá v měření smáčivosti, resp. roztekavosti pájecí pasty na vodivé ploše s příslušnou povrchovou úpravou. Po nanesení definovaného tvaru a množství pájecí pasty se sleduje míra roztečení pájky po přetavení pro různé povrchové úpravy a pro různé pájecí pasty. Pro přetavení pájecí pasty je využit exsikátor, u něhož je možnost nastavit dle požadavku nejen teplotní profil přetavení, ale také ochrannou dusíkovou atmosféru s nízkou koncentrací kyslíku.

Na Obr. 14a je zobrazeno experimentální pracoviště, na kterém probíhalo pájení přetavením a měření. Nalevo je umístěn analyzátor Ridzewski, který měří zbytkovou koncentraci kyslíku. Po jeho pravé straně je exsikátor, v němž byla nastavována koncentrace kyslíku. Přetavovací teplotní profil je řízen regulátorem R500, který je umístěn napravo. Detailní pohled na exsikátor je na Obr. 14b.



Obr. 14: Experimentální pracoviště a) Celkový pohled b) Detailní pohled na exsikátor s ukázkou pájeného spoje



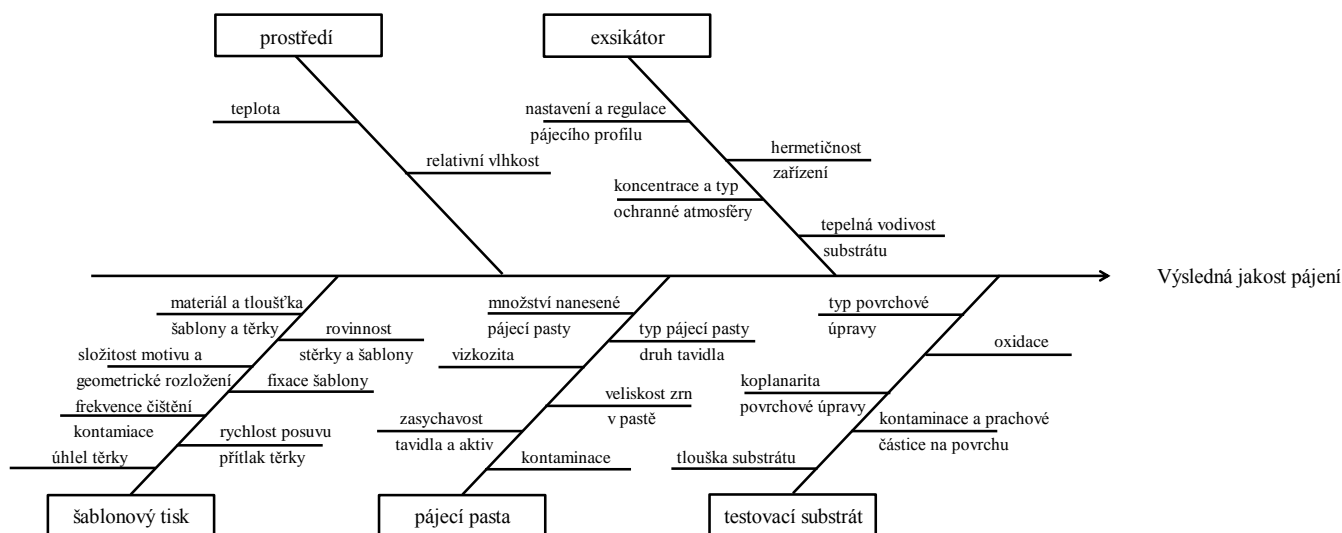
## 4.1 Plán testů

Pro testy byly zvoleny dva typy pájecích past. První je bezolovnatá pájecí pasta od společnosti Almit, typového označení LFM-48W TM-HP(L). Pasta má poměrové složení materiálů 96,5% Sn, 3% Ag a 0,5% Cu, a obsahuje 12% bezoplachového (no-clean) tavidla. Velikost vodivých částic pájky je 20 - 38  $\mu\text{m}$ .

Druhá testovací bezolovnatá pájecí pasta je od společnosti Balver Zinn – Cobar s typovým označení Cobar-OT2-SN100C-T3. Pasta má poměrové zastoupení materiálu Sn99.3% Cu0.7% Ni0.05% Ge0.005%.

Pro obě uvedené pájecí pasty byla měřena roztékavost na povrchové úpravě imerzní cín, a to na vzduchu, a dále při různých koncentracích zbytkového kyslíku v hodnotách 5000, 1000, 500, 200, 100, 50 a 20 ppm.

Ishikawa diagram znázorňující faktory, které ovlivňují proces pájení resp. jeho jakost, je na Obr. 15.



Obr. 15: Ishikawův diagram pro pájení v exsikátoru

### 4.1.1 Realizace testovaných vzorků

Realizace testovaných vzorků probíhala prvotním dělením základního organického substrátu (DPS) na testovací velikost ve tvaru čtverce o straně 25,4 mm. Nosný substrát je tvořen z materiálu FR4 na kterém je plátovaná měď o tloušťce 35  $\mu\text{m}$ , která byla povrchově upravena vrstvou imerzního cínu, jehož tloušťka dle výrobce se pohybuje v rozmezí 0,6 – 1,2  $\mu\text{m}$  [24].

#### Nanášení pájecí pasty

Pasta je na substrát nanášena použitím šablonového tisku, jehož součástí je šablona s daným motivem. Materiál šablony je zhotoven z ocelového plechu a jeho tloušťka je 150  $\mu\text{m}$ . Jedná se o poloautomatický model šablonového tisku s typovým označením Uniprint pmgo3v na Obr. 16.

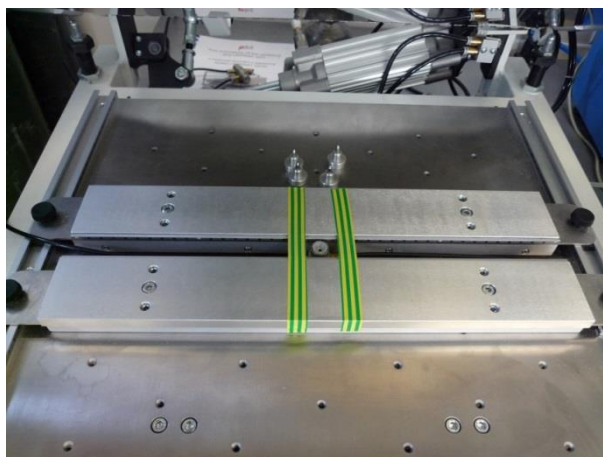
Substrát je vkládán na již předem definovaný prostor a boční strany jsou vycentrovány rovnoběžnými panely. Tímto způsobem je substrát zakotven proti pohybu či posunutí a je zabráněno špatnému natisknutí pasty.

Na substrát se nanáší přes motiv v šabloně pájecí pasta použitím dvou ocelových stěrek s automatickým posuvem. Tímto se zajistí přesně definované množství pájecí pasty na substrátu a tím lze zajistit reprodukovatelné měření.

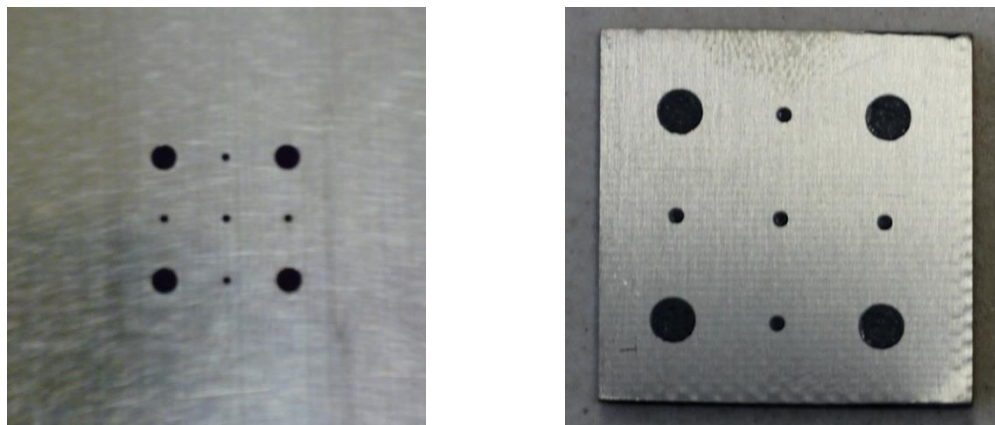
Na Obr. 18a je zobrazena šablona pro tisk a na Obr. 18b testovací substrát s již nanesenou pájecí pastou. Tisková šablona obsahuje celkem 9 měřících (testovacích) bodů, z toho jsou 4 větší o průměru 3 mm a 5 menších o průměru 1 mm, což vytváří dostatečné předpoklady pro obraz o roztékavosti pájky po přetavení.



Obr. 16: Šablonový tisk Uniprint pmgo3v



Obr. 17: Matrice pro ukotvení vzorků

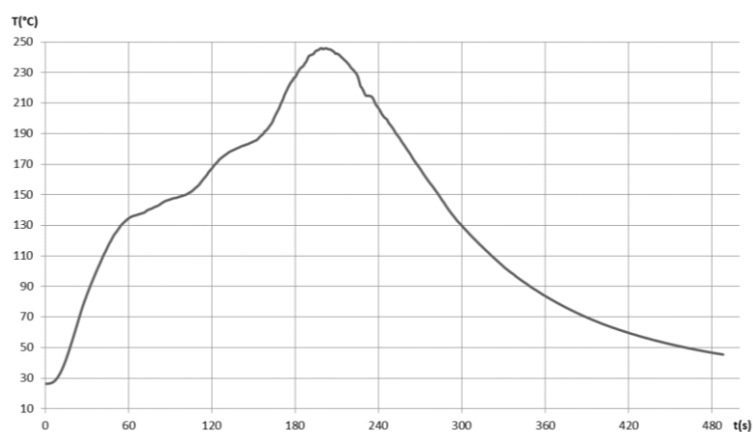


Obr. 18: a) Vyfocená šablona b) Natisknutá pájecí pasta na testovacím substrátu

### Přetavení pájecí pasty

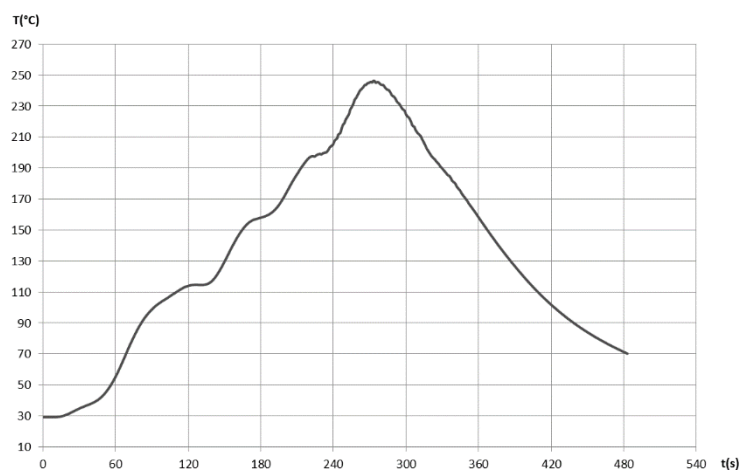
Pájecí profil po pájecí pastu LFM-48W TM-HP(L) byl realizován dle doporučení výrobce, aby byl splněn požadavek na pomalý náběh teploty 1,0 – 2,0 °C v průběhu do teploty 120 °C. Potom následuje v rozmezí teplot 170 - 190 °C rychlejší náběh a přetavovací teplota je 230 až 250 °C při dosažení teploty na liquidem 217°C a dobou nad ním je 40 s. Teplotní profil přetavením pro testování vzorku je znázorněn na

Obr. 19. Měření teploty se provádí testovacím termočlánkem typu K, který se měřicím okrajem dotýká okraje substrátu a jeho vrchní strana je zajištěná páskou odolávající vysokým teplotám.



Obr. 19: Teplotní profil pro pájecí pastu LFM-48W TM-HP(L)

Dle katalogového listu výrobce pro pastu Cobar-OT2-SN100C-T3 probíhá aktivace tavidel od teplot 150 do 200 °C, teplota změny na liquid je 227 °C a maximální přetavovací teplota v rozmezí teplot 240 - 250 °C. U nastaveného pájecího profilu při teplotách aktivace tavidla trvá 80 s., výrobce doporučuje rozmezí 20 - 150s a teplota nad liquidem je 45 s (dle doporučení výrobce 30 – 120 s). Vrcholová teplota je nastavena na 245 °C.



Obr. 20: Teplotní profil pro pájecí pastu Cobar-OT2-SN100C-T3

Pájecí profily jsou řízeny regulátorem R500. Typ řízení byl zvolen na program řízený časem a dosaženou teplotou. Dále byly upraveny regulační konstanty v regulátoru, aby bylo dosaženo optimálního pájecího profilu pro danou pájecí pastu.

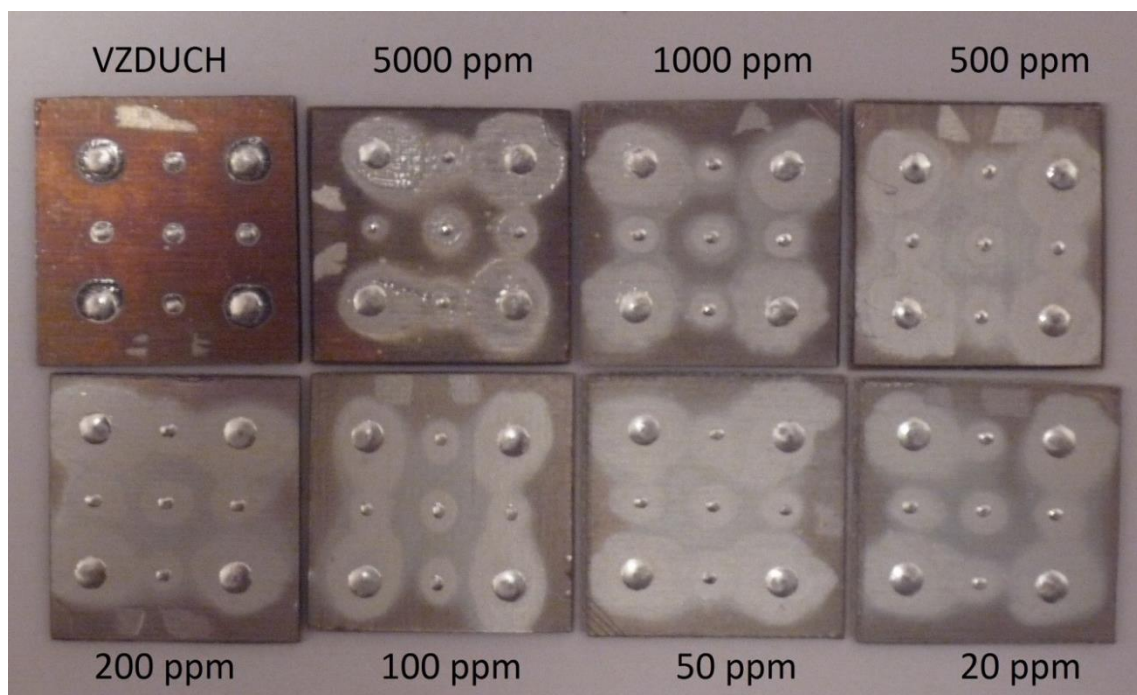
Profil pro pastu LFM-48W TM-HP(L)	
čas	teplota
1:00	125
0:10	148
0:50	180
0:05	234
0:10	232
0:05	230
<b>časová konstanta</b>	2
<b>dovolena odchylka</b>	4
<b>proporcionální konstanta</b>	29
<b>derivační konstanta</b>	50
<b>integrační konstanta</b>	2
<b>poplachová odchylka</b>	0

Profil pro pastu Cobar-OT2-SN100C-T3	
čas	teplota
0:35	35
1:10	115
1:30	200
0:15	250
0:10	232
časová konstanta	2
dovolena odchylka	2
proporcionální konstanta	10
derivační konstanta	50
integrační konstanta	2
poplachová odchylka	0

Po přetavení v exsikátoru se na testovaných vzorcích objevil neočekávaný jev. U vzorku s povrchovou úpravou imersní cín se testovala smáčivost pájky. Po přetavení tam pozorujeme difuzi mědi do cínu.

K objasnění tohoto jevu je nutné mít na paměti, že měď difunduje do vrstvy cínu a vzniká intermetalická sloučenina, která má vyšší bod tání, než pájka. Pro zabránění tohoto jevu, výrobci chemie pro povrchovou úpravu imersní cín řeší tuto problematiku doplněním difuzní bariery (jde v podstatě o povlak, který brání mědi rychle difundovat do cínu). Tedy jinak řečeno při povrchové úpravě je ještě vytvářena ochranná mezivrstva.

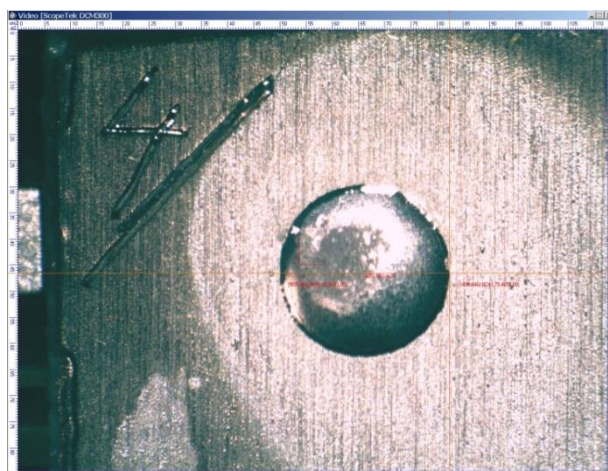
Příčin toho, že je vrstva cínu menší než požadovaná, může být více, ale často je tou hlavní nedostatečná údržba lázní. [27]



Obr. 21: Vzorky po přetavení v exsikátoru.

### 4.1.2 Naměřené hodnoty

Roztékavost pájecí pasty je hodnocena na základě měření roztékavosti pájky. Nejprve se provádí měření průměru jednotlivých obrazců pájecí pasty před přetavením. Měření je prováděno na stereo-mikroskopu Lynx Dynaskope a v programu ScopePhoto. Vzorek je znovu proměřen po přetavení, aby bylo možné zjistit, o kolik se pájka na dané povrchové úpravě roztekla. Z naměřených hodnot se vypočítá roztékavost jednotlivých měřicích bodů Obr. 22. Toto vyhodnocení je možné provádět dvěma způsoby, výsledky jsou podobné, jak vyplývá dále. U prvního způsobu se měří výška vrcholíku přetaveného pájecího spoje použitím výchylkoměru vyobrazený na Obr. 23. Jehož měřicí rozsah je od 0 – 1 mm s rozlišovacím krokem o přesnosti 0,001 mm.



Obr. 22: Software ScopePhoto - ukázkový snímek při měření bodu



Obr. 23: Fotografie výchylkoměru

V prvním případě je vyhodnocení provedeno dle rovnice 6, kde je bráno v úvahu i tloušťka šablony a výška zapájeného vrchlíku:

$$S_R = \frac{D_P - H_P}{D_T - H_T} * 100 (\%) \quad (6)$$

$D_P$	průměr obrazce po zapájení
$H_P$	výška vrchlíku po zapájení
$D_T$	průměr obrazce po natisknutí
$H_T$	výška obrazce po natisknutí (tloušťka šablony)

Druhá možnost vyhodnocení roztékavosti se provádí na základě následujícího výpočtu:

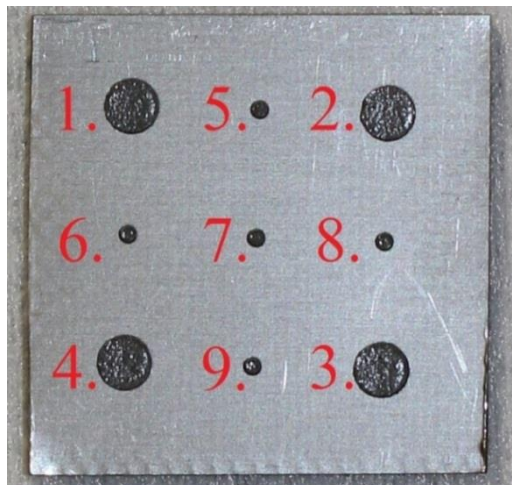
$$S_R = \frac{D_P}{D_T} * 100 (\%) \quad (7)$$

$D_P$	průměr obrazce po zapájení
$D_T$	průměr obrazce po natisknutí



### 4.1.3 Vyhodnocení roztékavosti pájky

Následné vyhodnocování roztékavosti kruhových obrazců bylo rozděleno na dvě samostatné skupiny velké a malé. Velké tvoří obrazce 1 až 4 a malé obrazce 5 až 9. Jednotlivé testovací obrazce jsou vyobrazeny na Obr. 24.



Obr. 24: Znáznornění měřících bodů na substrátu

Vyhodnocení bylo následně zpracováno do grafu dle použité pájecí slitiny. Přesné hodnoty jsou přiloženy v tabulkách: Tab. 3 a Tab. 4. Pro  $d$  (%) je provedeno vyhodnocení dle rovnice 7 a pro  $d$  (%) s vrchlíkem je vyhodnoceno dle rovnice 6. Pro aritmetický průměr je označen symbolem  $\mu$  a směrodatná odchylka  $\sigma$ . Kompletní vyhodnocení jednotlivých bodů je přiloženo v příloze. Je patrné, že vliv dusíkové atmosféry výrazně neovlivňuje velké obrazce a jejich vliv na roztékavost. Pozitivní vliv na roztékavost je u malých obrazců.

U pájecí slitiny SAC305 je patrný nárůst do zbytkové koncentrace 200 ppm, poté již další snižování zbytkového kyslíku nemá kladný vliv. Pájecí slitiny SAC305 vyhodnocena v grafu na Obr. 25.

Pájecí slitina SN100C vykazuje kladný nárůst do zbytkové koncentrace kyslíku 500 ppm. Dále se projevuje snížení roztékavosti snižováním zbytkové koncentrace kyslíku a další vrchol je až u hodnoty 50 ppm. Pájecí slitina SN100C je vyhodnocena na Obr. 26.



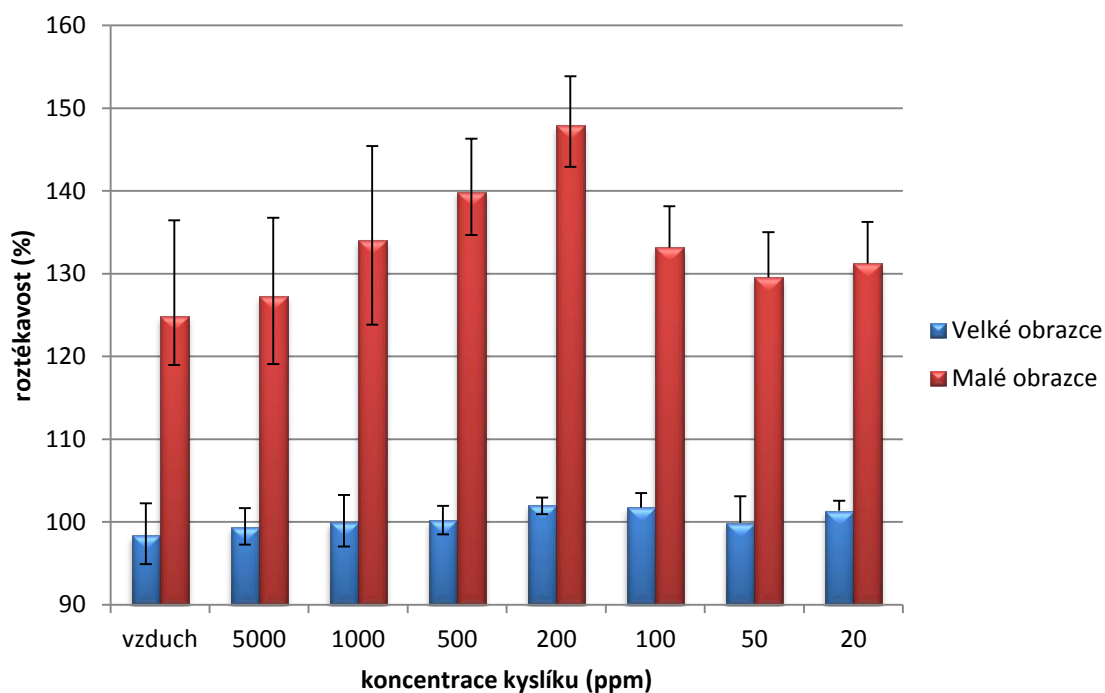
Tab. 3 Výsledky pro pájecí slitinu SAC305 pro velké a malé obrazce

Pájecí slitina SAC305					
Ppm	aritmetický průměr	Velké obrazce			
	směrodatná odchylka	po natisknutí (μm)	po přetavení (μm)	d (%)	d s vrchlíkem (%)
vzduch	μ	3103,9	3048,6	98,4	98,2
	σ	35,1	132,2	3,8	3,8
5000	μ	3205,5	3179,6	99,2	99,3
	σ	62,1	81,4	2,1	2,4
1000	μ	3214,6	3210,9	99,9	100,0
	σ	36,1	108,4	3,0	3,3
500	μ	3210,9	3213,4	100,1	100,2
	σ	29,9	54,2	1,7	1,7
200	μ	3187,0	3246,4	101,9	102,9
	σ	22,6	28,1	1,1	1,0
100	μ	3086,0	3128	101,4	101,7
	σ	42,0	45,0	1,6	1,8
50	μ	3095,0	3087,2	99,7	99,9
	σ	105,9	161,4	2,9	3,2
20	μ	3065,9	3095,0	101,0	101,4
	σ	42,9	33,7	1,1	1,2
Ppm	aritmetický průměr	Malé obrazce			
	směrodatná odchylka	po natisknutí (μm)	po přetavení (μm)	d (%)	d s vrchlíkem (%)
vzduch	μ	1070,8	1201,8	120,2	112,3
	σ	37,0	70	7,6	5,9
5000	μ	1105,5	1305,5	118,1	127,2
	σ	24,5	100,9	8,2	9,5
1000	μ	1111,1	1377,8	123,8	134,0
	σ	33,0	141,9	10,2	11,4
500	μ	1119,0	1443,3	129,0	139,9
	σ	17,3	59,7	5,5	6,5
200	μ	1083,1	1466,6	135,4	148,0
	σ	23,8	56,4	5,1	5,9
100	μ	1077,0	1323,7	122,9	133,1
	σ	31,5	60,8	4,3	5,0
50	μ	1054,6	1282,4	121,6	129,6
	σ	44,9	62,4	4,1	5,5
20	μ	1090,8	1326,5	121,7	131,2
	σ	42,0	51,9	3,9	5,0

Tab. 4: Výsledky pro pájecí slitinu SN100C pro velké a malé obrazce

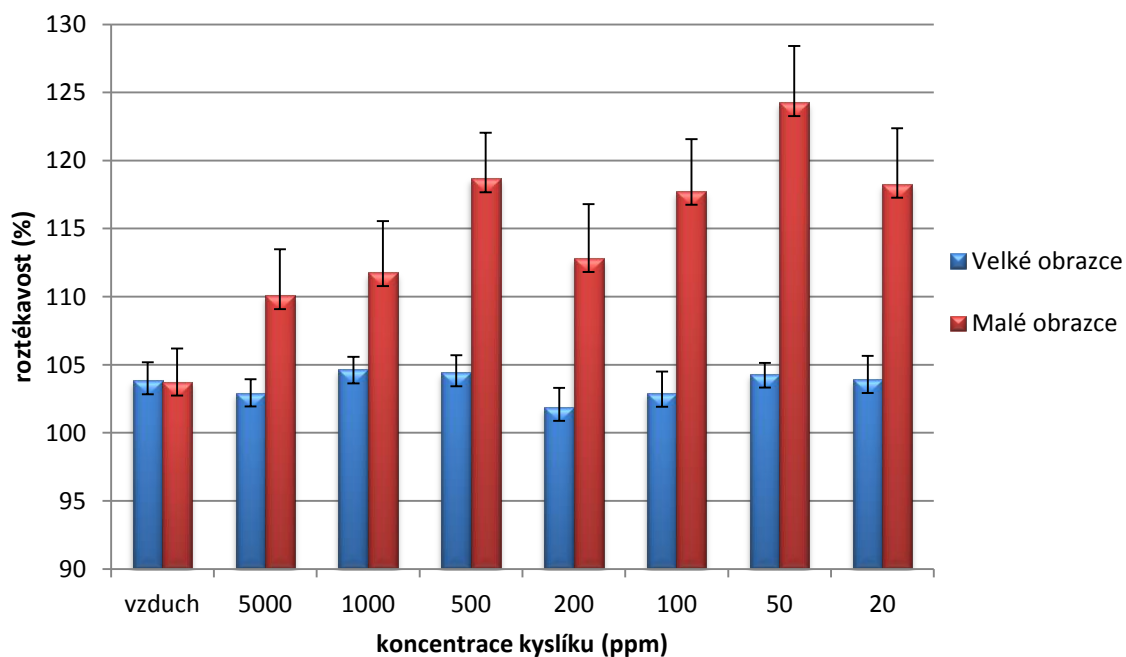
Pájecí slitina SN100C					
ppm	aritmetický průměr	Velké obrazce			
	směrodatná odchylka	po natisknutí (μm)	po přetavení (μm)	d (%)	d s vrchlíkem (%)
vzduch	μ	2985,9	3078,4	103,1	103,8
	σ	31,1	31,5	1,3	1,4
5000	μ	2978,8	3047,7	102,3	102,9
	σ	26,9	28,5	1,0	1,0
1000	μ	3029,0	3141,2	103,7	104,6
	σ	28,9	32,7	0,9	0,9
500	μ	2979,5	3086,6	103,6	104,4
	σ	25,1	41,0	1,2	1,3
200	μ	2996,9	3032,8	101,2	101,9
	σ	45,0	26,8	1,2	1,4
100	μ	3010,6	3081,2	102,3	102,9
	σ	18,1	42,3	1,5	1,6
50	μ	2996,7	3108,1	103,7	104,3
	σ	24,3	36,5	0,8	0,8
20	μ	3002,7	3101,5	103,3	103,9
	σ	48,8	40,9	1,6	1,7
ppm	aritmetický průměr	Malé obrazce			
	směrodatná odchylka	po natisknutí (μm)	po přetavení (μm)	d (%)	d s vrchlíkem (%)
vzduch	μ	1043,0	1057,7	101,4	103,7
	σ	17,4	20,0	2,1	2,5
5000	μ	1026,5	1086,4	105,8	110,1
	σ	25,5	44,0	3,2	3,4
1000	μ	1075,0	1152,6	107,2	111,8
	σ	20,5	30,3	3,0	3,8
500	μ	1025,7	1150,5	112,2	118,7
	σ	17,4	31,1	3,1	3,1
200	μ	1043,8	1124,6	107,8	112,8
	σ	36,9	38,5	3,1	4,0
100	μ	1042,6	1169,3	112,2	117,8
	σ	19,9	35,1	3,2	3,2
50	μ	1025,6	1201,7	117,2	124,3
	σ	20,5	50,6	3,7	4,1
20	μ	1035,3	1163,2	112,3	118,3
	σ	28,5	50,0	3,2	4,1

### Roztékavost pájecí slitiny SAC305 s vrchlíkem



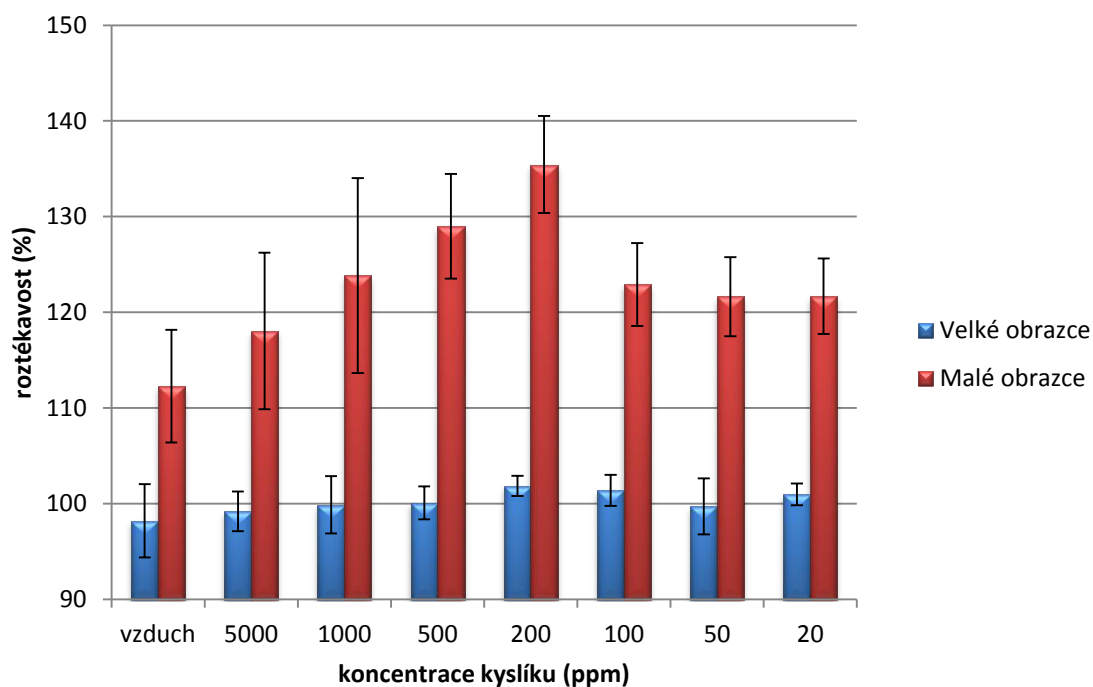
Obr. 25: Graf roztékavosti pájecí slitiny SAC305 s vyhodnocením vzorcem s vrchlíkem

### Roztékavost pájecí slitiny SN100C s vrchlíkem



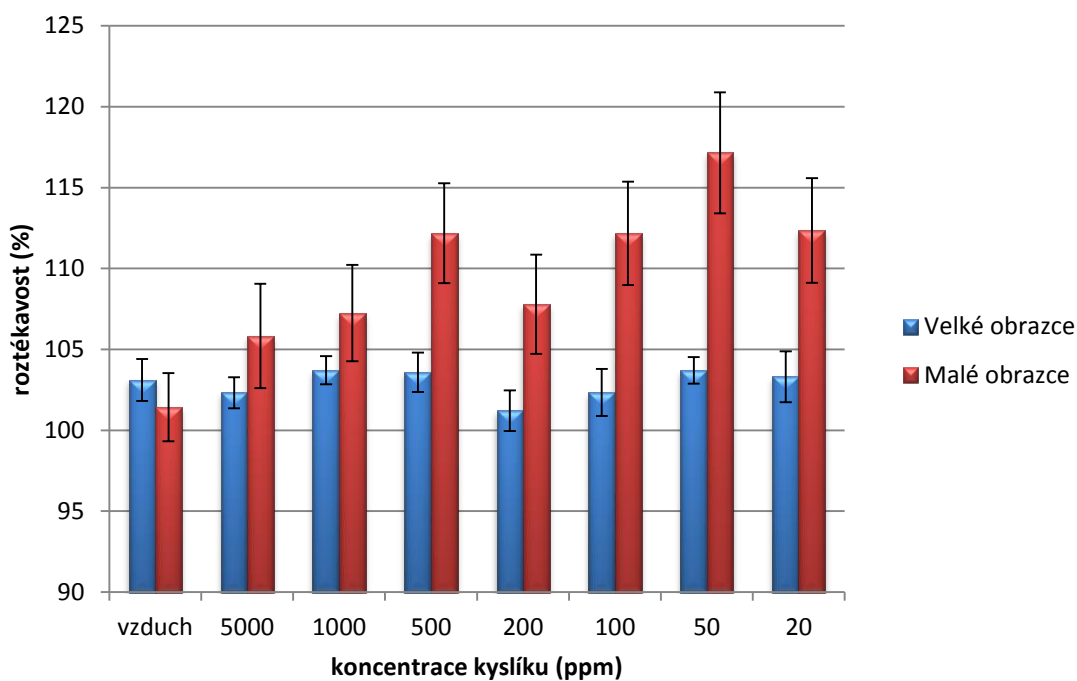
Obr. 26: Graf roztékavosti pájecí slitiny SN100C s vyhodnocením s vrchlíkem

## Roztěkavost pájecí slitiny SAC305



Obr. 27: Vyhodnocení pájecí slitiny SAC305

## Roztěkavost pájecí slitiny SN100C



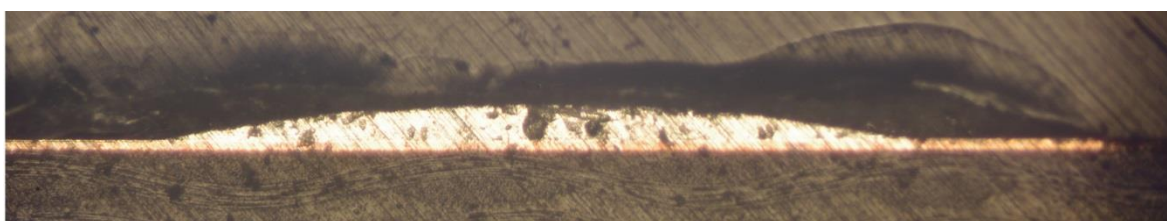
Obr. 28: Vyhodnocení pájecí slitiny SN100C

## 4.2 Metalografické výbrusy přetavených pájecích slitin

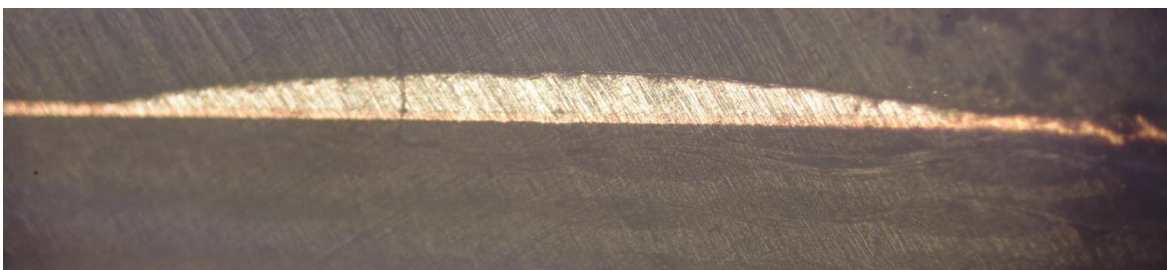
Výbrusy byly provedeny u velkých obrazců, aby byl zjištěn tvar vrchlíku přepájené slitiny v rozdílu pájení přetavením bez použití ochranné atmosféry a použitím ochranné atmosféry ve formě dusíku se zbytkovou koncentrací kyslíku.

### 4.2.1 SAC

U této pájecí slitiny je po vyhotovení výbrusu patrný jev agresivní slitiny pro měď a její rozpouštění v pájecí slitině. Po výbrusu přetaveného obrazce je patrné snížení tloušťky plátované mědi pod přetaveným obrazcem. U vzorku pájeného bez ochranné atmosféry jsou ve středové části bodu částečně viditelné voidy (prázdná místa) u pájení v ochranné atmosféře se tento jev již neprojevil.



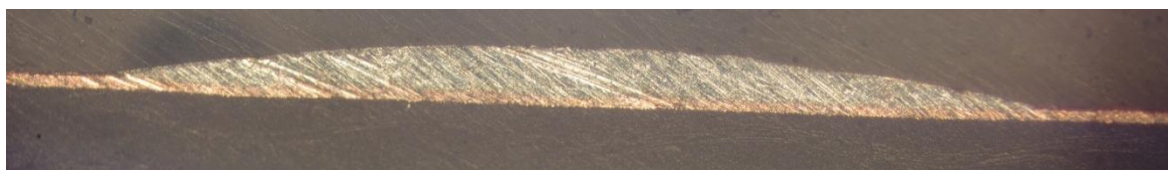
Obr. 29: Výbrus po přetavení pájecí slitiny SAC305 bez ochranné atmosféry



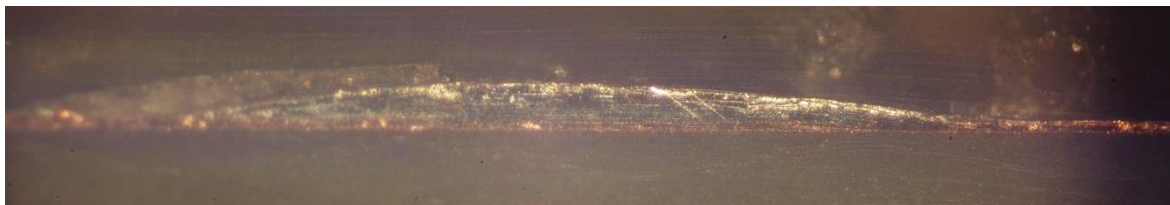
Obr. 30: Výbrus po přetavení pájecí slitiny SAC305 při zbytkové koncentraci kyslíku 20 ppm

### 4.2.2 SN100C

U pájecí slitiny SN100C již nejsou patrné rozdíly v pájení v přetavení bez použití ochranné atmosféry a při přetavení v ochranné atmosféře při zbytkové koncentraci kyslíku 20 ppm. Zde není zaznamenán viditelný rozdíl u pájeného obrazce.



Obr. 31: Výbrus po přetavení pájecí slitiny SN100C bez ochranné atmosféry



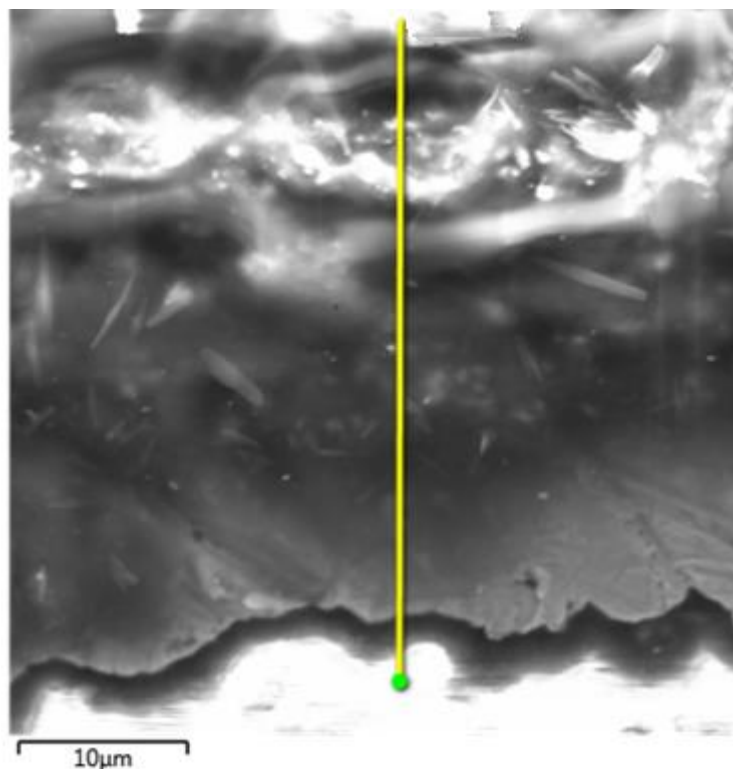
Obr. 32: Výbrus po přetavení pájecí slitiny SN100C při zbytkové koncentraci kyslíku 20 ppm

## 4.3 Prvkové analýzy vzorku

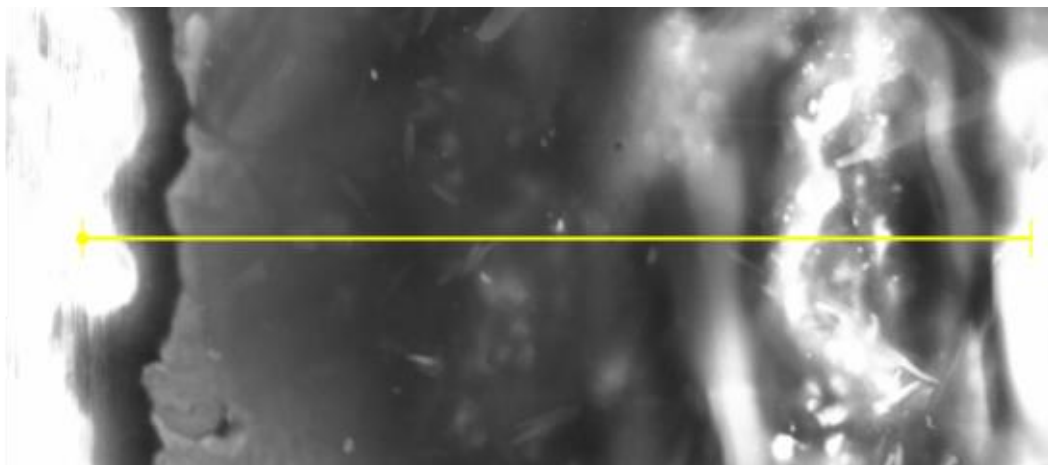
Byly zkoumány tloušťky vrstev imersního cínu u testovacího substrátu a rozdíly povrchové úpravy substrátu při přetavení bez ochranné atmosféry a v ochranné atmosféře při zbytkové koncentraci kyslíku o 20 ppm.

### 4.3.1 Analýza jednotlivých vrstev substrátu

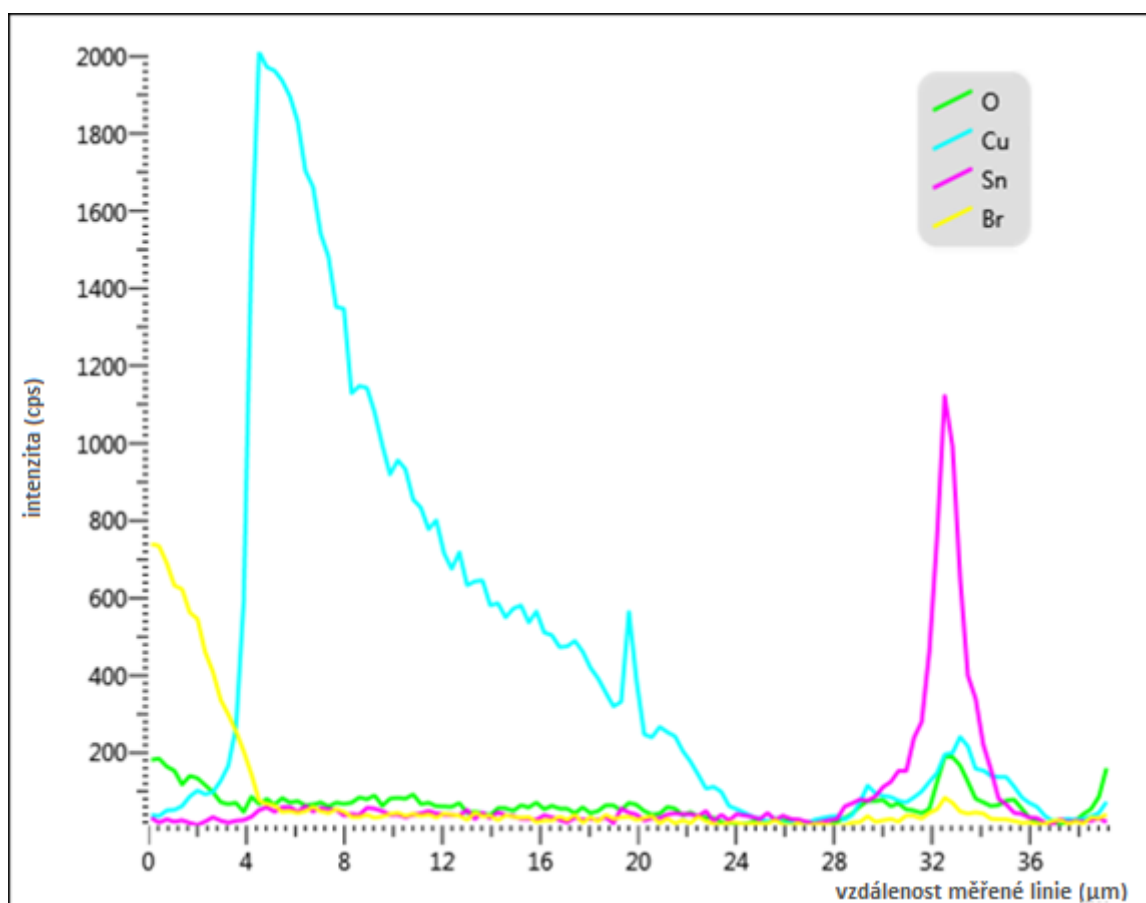
Byl prozkoumán výbrus testovaného substrátu v řezu. Na Obr. 33 vyobrazeného snímku je v dolní části zřetelně viditelný přechod mezi nosným substrátem FR4 a plátovanou mědi. Vrchní část je změna z plátované mědi na finální vrstvu imersního cínu již tady je patrná difuze cínu do mědi. Níže uvedené prvkové analýzy je zřetelný přechod.



Obr. 33: Snímek z elektronového mikroskopu pro podélný výbrus testovaného substrátu



Obr. 34: Snímek zkoumané oblasti dle měřené linie pro koncentrační profil prvků



Obr. 35: Výsledek analýzy zastoupení pro koncentrační profil

Na snímku Obr. 34 je žlutou čarou vyznačena trajektorie snímané oblasti a na Obr. 35 již je výsledek zastoupení jednotlivých prvků v dané části dle trajektorie. Z proběhlé analýzy je patrné že u organického substrátu FR4 je zastoupený prvek Brom (Br) ze skupiny halogenů zastoupený v pryskyřici. Následuje plátovaná měď (Cu) a poté je jemný přechod na cín. Z analýzy je patrné že cínová vrstva je mnohem silnější než 1  $\mu\text{m}$ , což může mít za následek částečné difuze do mědi již při výrobě substrátu.

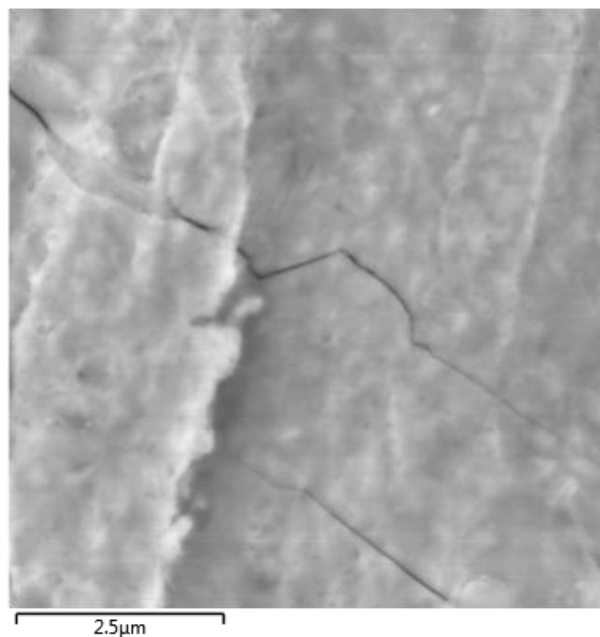


### 4.3.2 Analýza povrchu substrátu

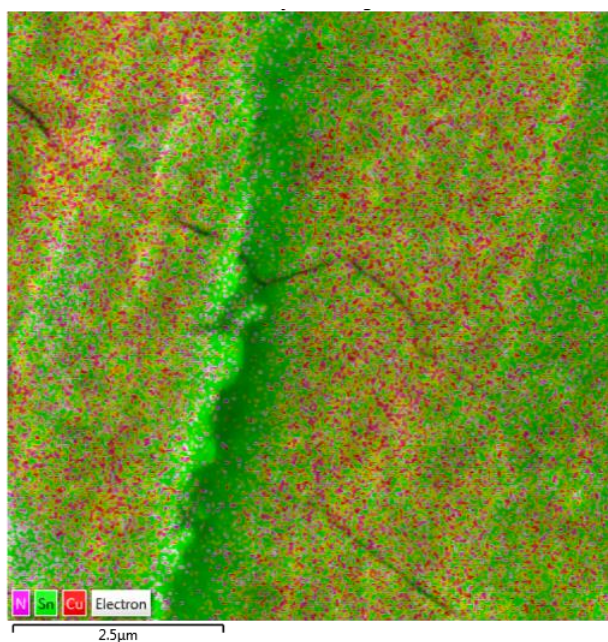
Byly provedeny dvě analýzy, aby bylo ověřeno zda imersní cín difunduje do plátované mědi při pájení přetavením. Substrát, na kterém byla přetavena pájecí slitina a následně byla vybrána oblast, a kde nebylo zbytkové tavidlo po přetavení z pájecí pasty.

První analýza proběhla na vzorku přetaveného bez ochranné atmosféry. Druhý vzorek byl zapájen v ochranné atmosféře se zbytkovým obsahem koncentrací o velikosti 20 ppm.

#### Analýza povrchu vzorku bez ochranné atmosféry

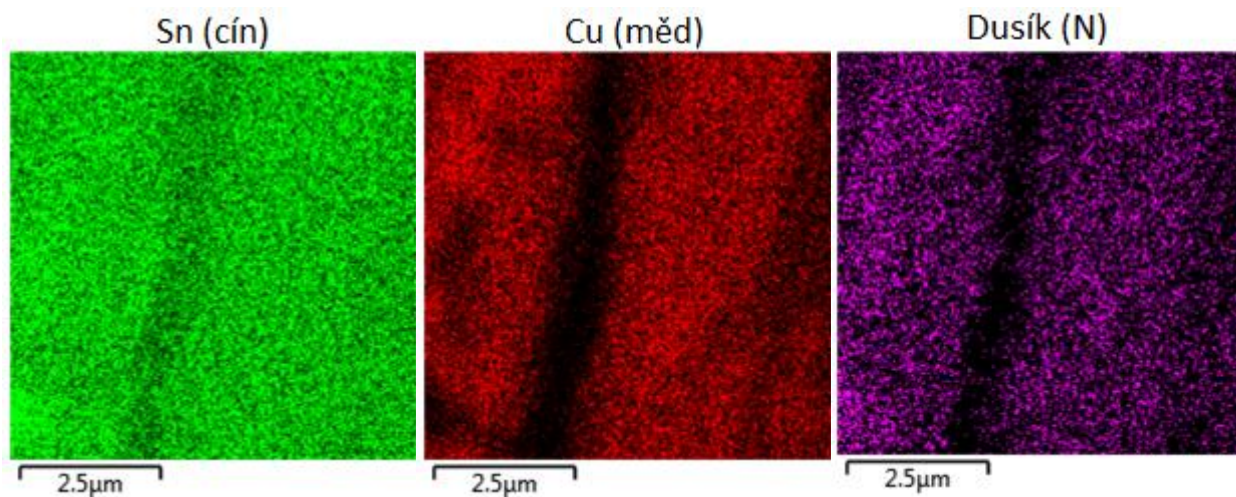


Obr. 36: Zkoumaná oblast povrchu substrátu po přetavení bez ochranné atmosféry.



Obr. 37: Spektrální analýza s koncentračním zastoupením prvků pro substrát bez ochranné atmosféry

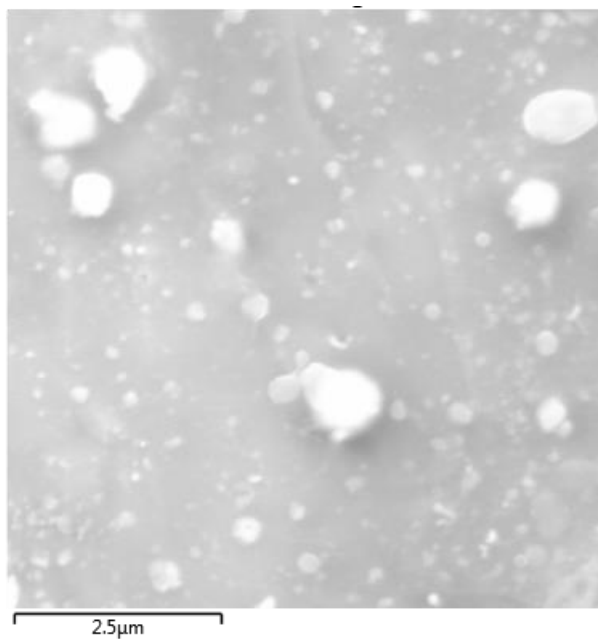




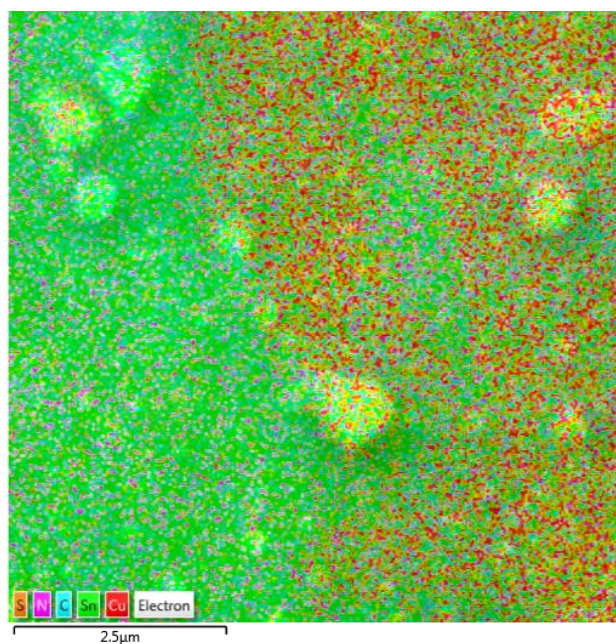
Obr. 38: Zastoupení jednotlivých prvků na zkoumaném povrchu substrátu

Zde je patrné zjištění že cín jen difunduje do mědi, která se na některých místech odhaluje a tím je způsoben vznik slitiny bronzu. Z tohoto důvodu vysvětlit i změnu zbarvení povrchu po pájení přetavením a možnost oxidace odhalené slitiny. Další objevený faktor je vznik mikroskopických prasklin na svém povrchu vzorku.

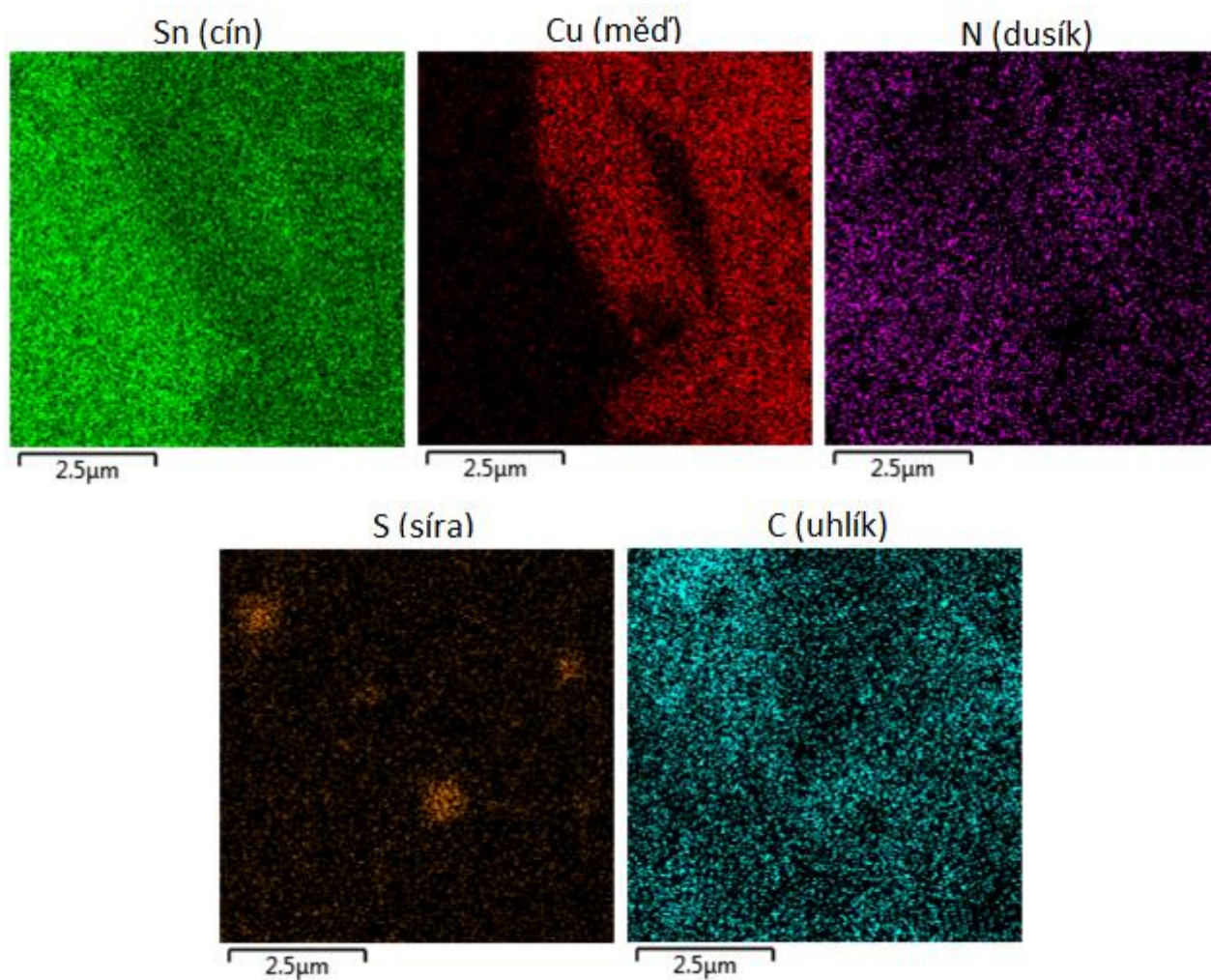
**Analýza vzorku ochranné atmosféry se zbytkovým obsahem koncentrace kyslíku o koncentraci 20 ppm.**



Obr. 39: Zkoumaná oblast povrchu substrátu po přetavení s ochrannou atmosférou s koncentrací zbytkového kyslíku



Obr. 40: Spektrální analýza povrchu s koncentračním zastoupením všech prvků po přetavení v ochranné atmosféře



Obr. 41: Zastoupení jednotlivých prvků na zkoumaném povrchu substrátu

Zde je také patrná difuze cínu do mědi. Povrch je i pod zvětšením je celistvý a bez prasklin.

## 5 INOVACE EXPERIMENTÁLNÍHO PRACOVISTĚ

Inovace spočívá v novém návrhu řídicí desky výkonového obvodu pro obě větve spínání na jednu desku oproti předešlým dvěma deskám a zabudováním přístrojové krabičky s indikací sepnutí a s vypínačem pro možné připojení nebo odpojení vytápění každého jednotlivého okruhu. Pro spínání topných spirál je k exsikátoru použit podpůrný obvod, na jehož vstupní optočlen se připojí regulátor. Výkonový MOSFET následně spíná zdroj. Původní řešení se dvěma identickými deskami, mělo za následek to, že zařízení bylo nepraktické a celkové zařízení se špatně přesouvalo. Podrobné obvodové zapojení je blíže popsáno v [26].

### Konstrukční část

Pro konstrukci byla zvolena konstrukční krabička z hliníku s typovým označením U-HA1455N1202. Do předního panelu byly zabudovány kolébkové vypínače a signalizační LED. Na zadním panelu je otvor pro připojení konektoru pro další zařízení. Výsledné zpracování je vyobrazeno na Obr. 42.

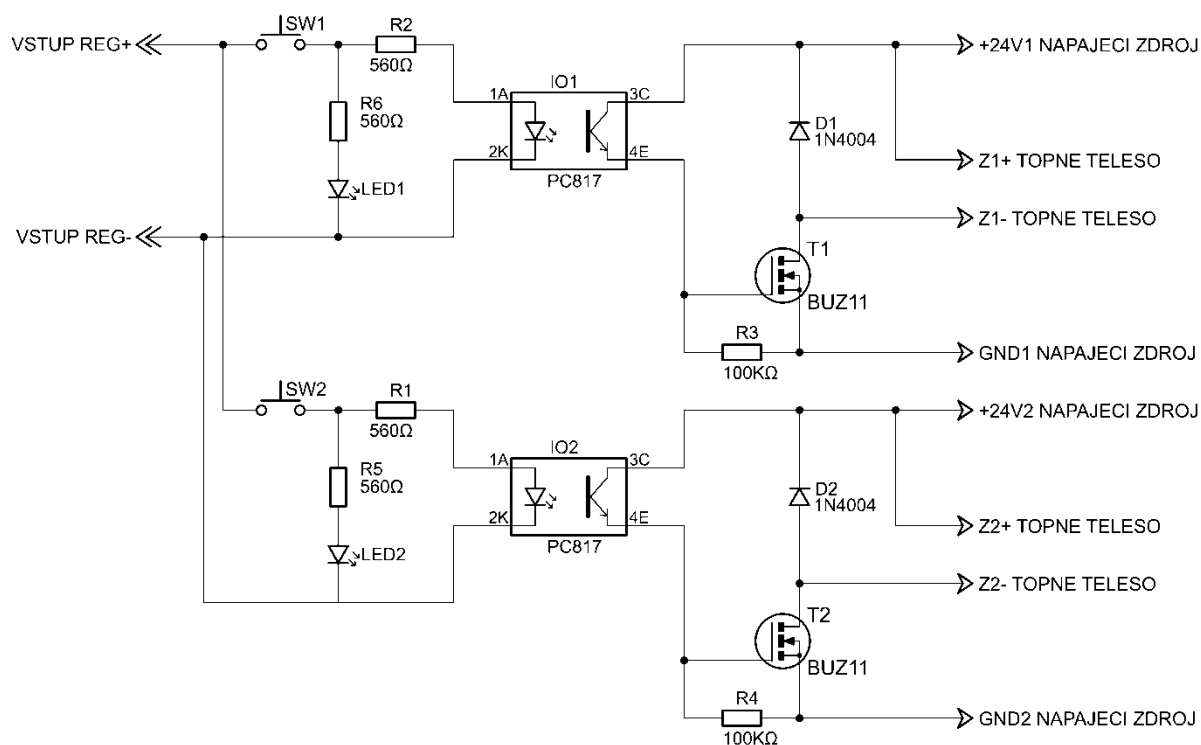


Obr. 42: Box s řídicím obvodem pro spínání topných spirál

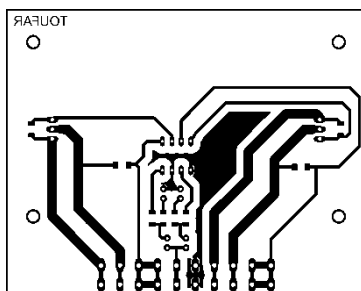
### Elektrická část

Zapojení je navrženo na jednostranné desce, na které je obvod vytvořený dvakrát, aby bylo možné zvlášť ovládat obě topné spirály. Každá lze sepnout přes samostatný kolébkový vypínač umístěný v panelu. Při sepnutí tranzistoru se na panelu rozsvítí indikační červená LED dioda.

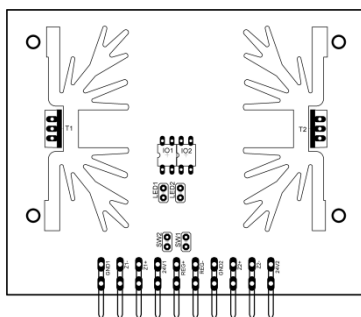




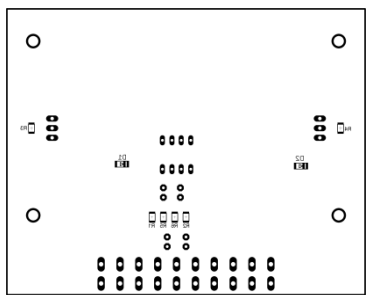
Obr. 43: Schéma zapojení spínání topných těles



Obr. 44: DPS rozměr desky 95 x 80, měřítko M 1:2



Obr. 45: Osazovací plán vrchní strany, rozměr desky 95 x 80, měřítko M 1:2



Obr. 46: Osazovací plán spodní strany, rozměr desky 95 x 80, měřítko M 1:2

# ZÁVĚR

Práce je zaměřena na experimentální ověřování vlivu ochranné dusíkové atmosféry na roztékavost pájecí slitiny. Pro vytvoření definované dusíkové atmosféry bylo využito zařízení nazvané exsikátor, jež bylo vyvinuto v laboratořích UMEL. Pro ověření správné koncentrace zbytkového kyslíku, byl využit analyzátor Ridzewski.

Testovací substrát byl zvolen na materiálu FR4 s plátovanou mědí o tloušťce 35  $\mu\text{m}$ , na nichž je povrchová úprava imersní cín. Na každý testovací substrát byly nanесeny 4 velké kruhové obrazce o průměru 3mm a 5 malých kruhových obrazců o průměru 1 mm

Byly proměřeny dvě nejběžněji používané bezolovnaté pájecí slitiny SAC305 s typovým označením LFM-48W TM-HP(L) a SN100C s typovým označením Cobar-OT2-SN100C-T3. U těchto past byla proměřena roztékavost: bez použití ochranné atmosféry a pro zbytkové koncentrace kyslíku pro 5000, 1000, 500, 200, 100, 50 a 20 ppm. Roztékavost pájky poté byla vyhodnocena dvěma způsoby. Prvním způsobem vyhodnocení se roztékavosti započítává do vzorce výška šablony, výška vrchlíku po přetavení, změření průměru po natisknutí a po přetavení v exsikátoru. Druhým způsobem bylo jen změření průměru po natisknutí a po přetavení z toho byl vyhodnocený výsledný roztok pájecí slitiny. U obou vyhodnocení výsledné roztékavosti pájky příliš nelišily.

Kladný vliv ochranné atmosféry se minimálně projevuje pro velké obrazce, kde je nárůst roztékavosti skoro zanedbatelný. O něco lépe se roztéká pájka SN100C. U malých pájecích obrazců je vliv pájecí slitiny mnohem příznivější. Při dosavadním trendu nových pouzder typu Fine Pitch je toto zjištění výhodné. Pájecí slitina SAC305 příznivě působí snižující se zbytková atmosféra, kdy je kladný vliv na roztékavost a při svém maximu dosahuje při koncentraci 200 ppm. U pájecí slitiny SN100C roztékavost dosahuje kladného průběhu až do koncentrace 500ppm a další zvýšení roztékavosti je u hodnoty 50 ppm. Při nejnižší koncentraci 20 ppm se již u testovaných slitin kladný vliv neprojevil.

Základním poznáním je skutečnost, že při neustále snižující se koncentraci kyslíku se neprojevuje kladný vliv na roztékavost pájecí slitiny.

Vyhodnocením vlivu ochranné atmosféry na vrstvu imersního cínu bylo zjištěno, že cín při přetavení difunduje do mědi a má za následek povrchové oxidace projevující se vystupováním mědi na povrch. Tento fakt je vysvětlením změny zbarvení po přetavení dle koncentrace zbytkového kyslíku. Místa pokrytá tavidlem jsou chráněna proti oxidaci, proto nejsou oblasti okolo zapájených obrazců zoxidovány.

# LITERATURA

- [1] STARÝ, J.; ZATLOUKAL, M.; STEJSKAL, P. Montážní a propojovací technologie. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií. [skripta] Nedatováno. 262 s.
- [2] Odpady, RoHS. ING. DAVID GREBENÍČEK. [online]. [cit. 2013-10-20]. Dostupné z: <<http://www.itczlin.cz/odpady-rohs>>
- [3] SZENDIUCH, Ivan. Pájení a bezolovnaté pájky [online]. [citováno 2013-10-20]. Dostupné z: <<http://www.printed.cz/assets/photos/pb-free.pdf>>.
- [4] Bezolovnaté pájení. [online]. [cit. 2013-10-20]. Dostupné z: <http://www.kirsten.cz/bezolovnate-pajeni.html>
- [5] LAWTON, Leora. Nitrogen Atmosphere: Who Need It?. [online]. 1998, s. 3 [cit. 2013-11-24]. Dostupné z: <http://www.techsociety.com/articles/nitrogen.pdf>
- [6] Soldering in a nitrogen atmosphere. [online]. s. 5 [cit. 2013-10-23]. Dostupné z: <http://www.tequipment.net/pdf/Hakko/TN00000022.pdf>
- [7] SZENDIUCH, Ivan.: Základy technologie mikroelektronických obvodů a systémů. VUTIMUM, 2006, ISBN 80-214-3292-6
- [8] SZENDIUCH, Ivan. Technologie elektrotechnických obvodu a systému. Brno: VUTIMUM, 2002. ISBN 80-214-2072-3
- [9] Normy.biz. [online]. [cit. 2013-11-24]. Dostupné z: <http://shop.normy.biz/search.php?find=%C4%8CSN%20EN%2062137-1&page=1>
- [10] STARÝ, Jiří; KAHLE, Petr. Plošné spoje a povrchová montáž [online]. Skriptum. VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ, Dostupné z: <[https://www.vutbr.cz/www\\_base/priloha.php?dpid=21618](https://www.vutbr.cz/www_base/priloha.php?dpid=21618)>.
- [11] Použití dusíku v procesu pájení. [online]. 9.6.2010 [cit. 2013-10-24]. Dostupné z: <http://www.smtcentrum.cz/cs/dusik-v-procesu-pajeni/pouziti-dusiku-v-procesu-pajeni/>
- [12] Bezolovnaté pájení. [online]. [cit. 2013-10-28]. Dostupné z: <http://www.kirsten.cz/bezolovnate-pajeni.html>
- [13] PELC, M. *Výzkum spolehlivosti bezolovnatých pájených spojů*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2011. 80 s. Vedoucí práce: doc. Ing. Ivan Szendiuch, CSc..
- [14] SCHUELLER, Randy. CONSIDERATIONS FOR SELECTING A PRINTED CIRCUIT BOARD SURFACE FINISH. [online]. s. 8 [cit. 2013-11-1]. Dostupné z: [http://www.dfrsolutions.com/pdfs/SMTAI\\_2010\\_Schueller.pdf](http://www.dfrsolutions.com/pdfs/SMTAI_2010_Schueller.pdf)
- [15] PCB Surface Finishes. [online]. [cit. 2013-11-5]. Dostupné z: <http://www.freetronics.com/pages/pcb-surface-finishes#.UmPtSvnIZfh>
- [16] Povrchové úpravy používané v naší výrobě. [online]. [cit. 2013-11-8]. Dostupné z: <http://www.semach.cz/povrchy3.htm>
- [17] Povrchové úpravy. FRANKO, Jakub. LAMIER PCB EUROPE S.R.O. [online]. 2010 [cit. 2013-11-2]. Dostupné z: <http://www.lamirel.cz/povrchoveupravy.aspx>
- [18] Printed circuit board surfaces. [online]. [cit. 2013-11-8]. Dostupné z: <http://www.multi-circuit-boards.eu/en/pcb-design-aid/surfaces.html>
- [19] Pájení bez olova: OSP. [online]. [cit. 2013-11-8]. Dostupné z: <http://www.printed.cz/osp-947>
- [20] Povrchové úpravy. PRAGOBOARD S.R.O. [online]. 2012 [cit. 2013-11-28]. Dostupné z: [http://www.pragoboard.cz/povrchove\\_upravy](http://www.pragoboard.cz/povrchove_upravy)
- [21] MILAD, George. UYEMURA CORPORATE HEADQUARTERS. Surface Finishing for



- Lead-Free [online]. 2011 [cit. 2013-11-28]. Dostupné z: <http://www.uyemura.com/library-4.ht>
- [22] Srovnání pájecích slitin SAC a Sn100. [online]. 31. 12. 2009 [cit. 2013-11-28]. Dostupné z: <http://www.smtcentrum.cz/cs/vyber-pajecich-slitin/srovnani-pajecich-slitin-sac-a-sn100/>
- [23] SN100C: Lead-Free Solder Alloy. 2012, s. 2. Dostupné z: [http://www.aimsolder.com/sites/default/files/alloy\\_sn100c\\_rev\\_7.pdf](http://www.aimsolder.com/sites/default/files/alloy_sn100c_rev_7.pdf)
- [24] ČeMeBo: Výroba plošných spojů. [online]. 2007 [cit. 2013-12-12]. Dostupné z: [http://www.cemebo.cz/technicke\\_moznosti\\_cz.php](http://www.cemebo.cz/technicke_moznosti_cz.php)
- [25] TOUFAR, M. *Zjišťování spolehlivosti pájených spojů*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2014. 40 s. Vedoucí práce: doc. Ing. Ivan Szendiuch, CSc.
- [26] VALA, R. *Testování vlastností pájek v ochranné atmosféře*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2013. 78 s. Vedoucí semestrální práce doc. Ing. Ivan Szendiuch, CSc.
- [27] KRÁLOVÁ, Iva. MANAŽER JAKOSTI ve firmě Semach s.r.o.. Konzultace přes email, 2014.

# SEZNAM PŘÍLOH

<b>A</b>	<b>Tabulky naměřených hodnot</b>	<b>59</b>
A.1	Vyhodnocení pájecích obrazců pro pájecí slitinu SAC305 .....	59
A.2	Vyhodnocení pájecích obrazců pro pájecí slitinu SN100C .....	75

# A TABULKY NAMĚŘENÝCH HODNOT

## A.1 Vyhodnocení pájecích obrazců pro pájecí slitinu SAC305

Tab. 5: Výsledky testu bez ochranné atmosféry roztékavosti pájky pro velké body

Pro měřící body 1 až 4						
		po natisknutí (μm)	po přetavení (μm)	výška vrchlíku (μm)	d (%) s vrchlíkem	d (%)
Vzorek 1	Bod 1	3047,5	3047,5	144	100,2	100,0
	Bod 2	3052,8	3052,8	141	100,3	100,0
	Bod 3	3063,4	2915	137	95,4	95,2
	Bod 4	3052,8	2533,4	112	83,4	83,0
Vzorek 2	Bod 1	3116,4	3079,3	146	98,9	98,8
	Bod 2	3132,3	3132,3	164	99,5	100,0
	Bod 3	3100,5	3111,1	159	100,1	100,3
	Bod 4	3100,5	3068,7	144	99,1	99,0
Vzorek 3	Bod 1	3137,6	3148,2	138	100,8	100,3
	Bod 2	3137,6	3100,5	153	98,7	98,8
	Bod 3	3158,8	3116,4	60	101,6	98,7
	Bod 4	3137,6	3084,6	148	98,3	98,3
Vzorek 4	Bod 1	3111,1	3021	147	97,1	97,1
	Bod 2	3105,8	3074	156	98,7	99,0
	Bod 3	3164,1	3153,5	127	100,4	99,7
	Bod 4	3116,4	3074	148	98,6	98,6
Vzorek 5	Bod 1	3100,5	3042,2	154	97,9	98,1
	Bod 2	3063,4	3116,4	151	101,8	101,7
	Bod 3	3095,2	3063,4	152	98,9	99,0
	Bod 4	3084,6	3036,9	142	98,6	98,5
μ		3103,9	3048,6	141,2	98,4	98,2
σ		35,1	132,2	22,3	3,8	3,8

Tab. 6: Výsledky testu bez ochranné atmosféry roztékavosti pájky pro malé body

Pro měřicí body 5 až 9						
		po natisknutí ( $\mu\text{m}$ )	po přetavení ( $\mu\text{m}$ )	výška vrchlíku ( $\mu\text{m}$ )	d (%) s vrchlíkem	d (%)
Vzorek 1	Bod 5	1028,2	1150,1	95	120,1	111,9
	Bod 6	1001,7	1176,6	88	127,8	117,5
	Bod 7	1017,6	1081,2	97	113,4	106,3
	Bod 8	1033,5	1187,2	89	124,3	114,9
	Bod 9	1028,2	1181,9	88	124,6	114,9
Vzorek 2	Bod 5	1060	1181,9	88	120,2	111,5
	Bod 6	1107,7	1192,5	89	115,2	107,7
	Bod 7	1054,7	1171,3	94	119,1	111,1
	Bod 8	1134,2	1319,7	100	123,9	116,4
	Bod 9	1102,4	1213,7	96	117,4	110,1
Vzorek 3	Bod 5	1134,2	1219	89	114,8	107,5
	Bod 6	1097,1	1197,8	86	117,4	109,2
	Bod 7	1091,8	1123,6	95	109,2	102,9
	Bod 8	1060	1155,4	98	116,2	109,0
	Bod 9	1107,7	1234,9	102	118,3	111,5
Vzorek 4	Bod 5	1097,1	1187,2	148	109,7	108,2
	Bod 6	1033,5	1128,9	88	117,8	109,2
	Bod 7	1054,7	1107,7	83	113,3	105,0
	Bod 8	1081,2	1319,7	98	131,2	122,1
	Bod 9	1128,9	1298,5	70	125,5	115,0
Vzorek 5	Bod 5	1044,1	1245,5	86	129,7	119,3
	Bod 6	1060	1340,9	83	138,2	126,5
	Bod 7	1070,6	1303,8	78	133,2	121,8
	Bod 8	1081,2	1134,2	95	111,6	104,9
	Bod 9	1060	1192,5	157	113,8	112,5
$\mu$		1070,8	1201,8	95,2	120,2	112,3
$\sigma$		37,0	70,0	18,7	7,6	5,9

Tab. 7: Výsledky testu při zbytkovém kyslíku 5000 ppm roztékavosti pájky pro velké body

Pro měřící body 1 až 4						
		po natisknutí ( $\mu\text{m}$ )	po přetavení ( $\mu\text{m}$ )	výška vrchlíku ( $\mu\text{m}$ )	d (%) s vrchlíkem	d (%)
Vzorek 1	Bod 1	3209,3	3217,5	148	100,3	100,3
	Bod 2	3176,3	3126,8	133	98,9	98,4
	Bod 3	3209,3	3209,3	129	100,7	100,0
	Bod 4	3382,5	3390,8	81	102,4	100,2
Vzorek 2	Bod 1	3225,8	3184,5	145	98,8	98,7
	Bod 2	3234,0	3135,0	155	96,6	96,9
	Bod 3	3324,8	3250,5	143	97,9	97,8
	Bod 4	3283,5	3217,5	137	98,3	98,0
Vzorek 3	Bod 1	3143,3	3069,0	134	98,1	97,6
	Bod 2	3168,0	3110,3	141	98,4	98,2
	Bod 3	3176,3	3168,0	139	100,1	99,7
	Bod 4	3151,5	3192,8	141	101,7	101,3
Vzorek 4	Bod 1	3176,3	3258,8	159	102,4	102,6
	Bod 2	3151,5	3135,0	162	99,1	99,5
	Bod 3	3159,8	3176,3	133	101,1	100,5
	Bod 4	3143,3	3184,5	141	101,7	101,3
Vzorek 5	Bod 1	3184,5	3126,8	162	97,7	98,2
	Bod 2	3209,3	3027,8	167	93,5	94,3
	Bod 3	3192,8	3291,8	173	102,5	103,1
	Bod 4	3209,3	3118,5	169	96,4	97,2
$\mu$		3205,5	3179,6	144,6	99,3	99,2
$\sigma$		62,1	81,4	20,0	2,4	2,1

Tab. 8: Výsledky testu při zbytkovém kyslíku 5000 ppm roztékavosti pájky pro malé body

Pro měřící body 5 až 9						
		po natisknutí ( $\mu\text{m}$ )	po přetavení ( $\mu\text{m}$ )	výška vrchlíku ( $\mu\text{m}$ )	d (%) s vrchlíkem	d (%)
Vzorek 1	Bod 5	1089,0	1204,5	89	118,8	110,6
	Bod 6	1130,3	1394,3	93	132,7	123,4
	Bod 7	1105,5	1212,8	89	117,6	109,7
	Bod 8	1105,5	1254,0	83	122,6	113,4
	Bod 9	1113,8	1328,3	90	128,5	119,3
Vzorek 2	Bod 5	1146,8	1460,3	98	136,7	127,3
	Bod 6	1130,3	1369,5	91	130,4	121,2
	Bod 7	1113,8	1476,8	89	144,0	132,6
	Bod 8	1146,8	1344,8	86	126,3	117,3
	Bod 9	1146,8	1518,0	91	143,2	132,4
Vzorek 3	Bod 5	1064,3	1262,3	86	128,7	118,6
	Bod 6	1080,8	1270,5	79	128,0	117,6
	Bod 7	1072,5	1303,5	79	132,7	121,5
	Bod 8	1080,8	1419,0	82	143,6	131,3
	Bod 9	1089,0	1270,5	78	127,0	116,7
Vzorek 4	Bod 5	1089,0	1295,3	88	128,6	118,9
	Bod 6	1146,8	1196,3	60	114,0	104,3
	Bod 7	1122,0	1427,3	69	139,7	127,2
	Bod 8	1097,3	1295,3	87	127,6	118,0
	Bod 9	1080,8	1163,3	74	117,0	107,6
Vzorek 5	Bod 5	1097,3	1229,3	105	118,7	112,0
	Bod 6	1097,3	1278,8	103	124,1	116,5
	Bod 7	1089,0	1229,3	108	119,4	112,9
	Bod 8	1097,3	1311,8	131	124,7	119,6
	Bod 9	1105,5	1122,0	105	106,4	101,5
$\mu$		1105,5	1305,5	89,3	127,2	118,1
$\sigma$		24,5	100,9	14,2	9,5	8,2

Tab. 9: Výsledky testu při zbytkovém kyslíku 1000 ppm roztékavosti pájky pro velké body

Pro měřící body 1 až 4						
		po natisknutí ( $\mu\text{m}$ )	po přetavení ( $\mu\text{m}$ )	výška vrchlíku ( $\mu\text{m}$ )	d (%) s vrchlíkem	d (%)
Vzorek 1	Bod 1	3201,0	3316,5	145	103,9	103,6
	Bod 2	3184,5	3225,8	152	101,3	101,3
	Bod 3	3209,3	3258,8	136	102,1	101,5
	Bod 4	3176,3	3250,5	139	102,8	102,3
Vzorek 2	Bod 1	3267,0	3242,3	155	99,0	99,2
	Bod 2	3267,0	3324,8	157	101,6	101,8
	Bod 3	3283,5	3357,8	162	102,0	102,3
	Bod 4	3250,5	3283,5	147	101,2	101,0
Vzorek 3	Bod 1	3184,5	3275,3	117	104,1	102,8
	Bod 2	3217,5	3225,8	154	100,1	100,3
	Bod 3	3184,5	3234,0	138	102,0	101,6
	Bod 4	3225,8	3267,0	154	101,2	101,3
Vzorek 4	Bod 1	3242,3	3250,5	142	100,5	100,3
	Bod 2	3225,8	2994,8	160	92,2	92,8
	Bod 3	3234,0	3201,0	147	99,0	99,0
	Bod 4	3242,3	3258,8	132	101,1	100,5
Vzorek 5	Bod 1	3184,5	2945,3	143	92,3	92,5
	Bod 2	3168,0	3135,0	140	99,2	99,0
	Bod 3	3168,0	3069,0	146	96,9	96,9
	Bod 4	3176,3	3102,0	160	97,2	97,7
$\mu$		3214,6	3210,9	146,3	100,0	99,9
$\sigma$		36,1	108,4	11,1	3,3	3,0

Tab. 10: Výsledky testu při zbytkovém kyslíku 1000 ppm roztékavosti pájky pro malé body

Pro měřící body 5 až 9						
		po natisknutí ( $\mu\text{m}$ )	po přetavení ( $\mu\text{m}$ )	výška vrchlíku ( $\mu\text{m}$ )	d (%) s vrchlíkem	d (%)
Vzorek 1	Bod 5	1047,8	1410,8	83	147,9	134,6
	Bod 6	1080,8	1295,3	83	130,2	119,8
	Bod 7	1072,5	1287,0	84	130,4	120,0
	Bod 8	1097,3	1344,8	85	133,0	122,6
	Bod 9	1097,3	1336,5	86	132,0	121,8
Vzorek 2	Bod 5	1146,8	1452,0	86	137,0	126,6
	Bod 6	1179,8	1658,3	84	152,9	140,6
	Bod 7	1163,3	1633,5	91	152,2	140,4
	Bod 8	1171,5	1608,8	97	148,0	137,3
	Bod 9	1155,0	1650,0	87	155,5	142,9
Vzorek 3	Bod 5	1122,0	1427,3	88	137,8	127,2
	Bod 6	1113,8	1452,0	90	141,3	130,4
	Bod 7	1122,0	1419,0	104	135,3	126,5
	Bod 8	1097,3	1402,5	97	137,8	127,8
	Bod 9	1097,3	1468,5	98	144,7	133,8
Vzorek 4	Bod 5	1105,5	1311,8	87	128,2	118,7
	Bod 6	1130,3	1311,8	94	124,2	116,1
	Bod 7	1113,8	1303,5	84	126,5	117,0
	Bod 8	1113,8	1179,8	94	112,7	105,9
	Bod 9	1122,0	1295,3	97	123,3	115,4
Vzorek 5	Bod 5	1072,5	1163,3	77	117,8	108,5
	Bod 6	1080,8	1229,3	77	123,8	113,7
	Bod 7	1080,8	1237,5	77	124,7	114,5
	Bod 8	1089,0	1245,8	81	124,0	114,4
	Bod 9	1105,5	1320,0	82	129,6	119,4
$\mu$		1111,1	1377,8	87,7	134,0	123,8
$\sigma$		33,0	141,9	7,2	11,4	10,2



Tab. 11: Výsledky testu při zbytkovém kyslíku 500 ppm roztékavosti pájky pro velké body

Pro měřicí body 1 až 4						
		po natisknutí ( $\mu\text{m}$ )	po přetavení ( $\mu\text{m}$ )	výška vrchlíku ( $\mu\text{m}$ )	d (%) s vrchlíkem	d (%)
Vzorek 1	Bod 1	3184,5	3250,5	158	101,9	102,1
	Bod 2	3258,8	3234,0	117	100,3	99,2
	Bod 3	3217,5	3168,0	160	98,1	98,5
	Bod 4	3192,8	3159,8	132	99,5	99,0
Vzorek 2	Bod 1	3184,5	3217,5	140	101,4	101,0
	Bod 2	3176,3	3184,5	145	100,4	100,3
	Bod 3	3201,0	3118,5	160	97,0	97,4
	Bod 4	3201,0	3209,3	144	100,5	100,3
Vzorek 3	Bod 1	3209,3	3217,5	166	99,7	100,3
	Bod 2	3275,3	3283,5	127	101,0	100,3
	Bod 3	3283,5	3201,0	132	97,9	97,5
	Bod 4	3209,3	3102,0	141	96,8	96,7
Vzorek 4	Bod 1	3192,8	3209,3	155	100,4	100,5
	Bod 2	3201,0	3300,0	151	103,2	103,1
	Bod 3	3234,0	3300,0	148	102,2	102,0
	Bod 4	3209,3	3242,3	134	101,6	101,0
Vzorek 5	Bod 1	3209,3	3192,8	159	99,2	99,5
	Bod 2	3192,8	3250,5	168	101,3	101,8
	Bod 3	3184,5	3168,0	139	99,8	99,5
	Bod 4	3201,0	3258,8	152	101,8	101,8
$\mu$		3210,9	3213,4	146,4	100,2	100,1
$\sigma$		29,9	54,2	13,7	1,7	1,7

Tab. 12: Výsledky testu při zbytkovém kyslíku 500 ppm roztékavosti pájky pro malé body

Pro měřicí body 5 až 9						
		po natisknutí ( $\mu\text{m}$ )	po přetavení ( $\mu\text{m}$ )	výška vrchlíku ( $\mu\text{m}$ )	d (%) s vrchlíkem	d (%)
Vzorek 1	Bod 5	1130,3	1510,5	152	138,6	133,6
	Bod 6	1105,5	1494,6	78	148,3	135,2
	Bod 7	1138,5	1478,7	78	141,7	129,9
	Bod 8	1122,0	1470,8	82	142,9	131,1
	Bod 9	1155,0	1478,7	79	139,3	128,0
Vzorek 2	Bod 5	1105,5	1375,4	85	135,0	124,4
	Bod 6	1122,0	1391,3	90	133,9	124,0
	Bod 7	1113,8	1383,3	93	133,9	124,2
	Bod 8	1113,8	1367,4	77	133,9	122,8
	Bod 9	1138,5	1359,5	82	129,2	119,4
Vzorek 3	Bod 5	1130,3	1470,8	83	141,6	130,1
	Bod 6	1097,3	1454,9	96	143,5	132,6
	Bod 7	1105,5	1407,2	88	138,1	127,3
	Bod 8	1155,0	1462,8	77	137,9	126,6
	Bod 9	1122,0	1415,1	86	136,7	126,1
Vzorek 4	Bod 5	1089,0	1501,5	89	150,4	137,9
	Bod 6	1113,8	1485,0	67	147,1	133,3
	Bod 7	1105,5	1509,8	79	149,7	136,6
	Bod 8	1122,0	1567,5	91	151,9	139,7
	Bod 9	1130,3	1493,3	82	144,0	132,1
Vzorek 5	Bod 5	1113,8	1454,9	104	140,2	130,6
	Bod 6	1105,5	1407,2	99	136,9	127,3
	Bod 7	1105,5	1311,8	97	127,1	118,7
	Bod 8	1097,3	1423,1	84	141,4	129,7
	Bod 9	1138,5	1407,2	89	133,3	123,6
$\mu$		1119,0	1443,3	88,3	139,9	129,0
$\sigma$		17,3	59,7	15,6	6,5	5,5

Tab. 13: Výsledky testu při zbytkovém kyslíku 200 ppm roztékavosti pájky pro velké body

Pro měřící body 1 až 4						
		po natisknutí ( $\mu\text{m}$ )	po přetavení ( $\mu\text{m}$ )	výška vrchlíku ( $\mu\text{m}$ )	d (%) s vrchlíkem	d (%)
Vzorek 1	Bod 1	3176,3	3258,8	142	103,0	102,6
	Bod 2	3184,5	3242,3	150	101,9	101,8
	Bod 3	3201,0	3250,5	156	101,4	101,5
	Bod 4	3250,5	3275,3	158	100,5	100,8
Vzorek 2	Bod 1	3184,5	3291,8	147	103,6	103,4
	Bod 2	3168,0	3201,0	145	101,3	101,0
	Bod 3	3151,5	3242,3	160	102,7	102,9
	Bod 4	3192,8	3201,0	144	100,5	100,3
Vzorek 3	Bod 1	3184,5	3275,3	166	102,5	102,8
	Bod 2	3209,3	3217,5	127	101,0	100,3
	Bod 3	3192,8	3217,5	132	101,4	100,8
	Bod 4	3209,3	3225,8	141	100,8	100,5
Vzorek 4	Bod 1	3184,5	3283,5	155	103,1	103,1
	Bod 2	3192,8	3258,8	151	102,1	102,1
	Bod 3	3192,8	3283,5	148	103,0	102,8
	Bod 4	3201,0	3234,0	134	101,6	101,0
Vzorek 5	Bod 1	3159,8	3217,5	159	101,6	101,8
	Bod 2	3168,0	3275,3	168	103,0	103,4
	Bod 3	3151,5	3234,0	139	103,1	102,6
	Bod 4	3184,5	3242,3	152	101,8	101,8
$\mu$		3187,0	3246,4	148,7	102,0	101,9
$\sigma$		22,6	28,1	11,0	1,0	1,1

Tab. 14: Výsledky testu při zbytkovém kyslíku 200 ppm roztékavosti pájky pro malé body

Pro měřící body 5 až 9						
		po natisknutí (μm)	po přetavení (μm)	výška vrchlíku (μm)	d (%) s vrchlíkem	d (%)
Vzorek 1	Bod 5	1138,5	1502,6	84	143,5	132,0
	Bod 6	1080,8	1439,0	81	145,9	133,1
	Bod 7	1080,8	1423,1	90	143,2	131,7
	Bod 8	1080,8	1415,1	80	143,4	130,9
	Bod 9	1105,5	1542,3	87	152,3	139,5
Vzorek 2	Bod 5	1113,8	1494,6	85	146,3	134,2
	Bod 6	1064,3	1439,0	90	147,5	135,2
	Bod 7	1064,3	1478,7	93	151,6	138,9
	Bod 8	1056,0	1486,7	77	155,6	140,8
	Bod 9	1080,8	1462,8	82	148,4	135,4
Vzorek 3	Bod 5	1113,8	1518,5	83	148,9	136,3
	Bod 6	1097,3	1383,3	96	135,9	126,1
	Bod 7	1089,0	1367,4	88	136,3	125,6
	Bod 8	1105,5	1423,1	77	140,9	128,7
	Bod 9	1105,5	1439,0	86	141,6	130,2
Vzorek 4	Bod 5	1089,0	1534,4	89	153,9	140,9
	Bod 6	1056,0	1415,1	67	148,8	134,0
	Bod 7	1080,8	1486,7	79	151,2	137,6
	Bod 8	1105,5	1629,8	91	161,0	147,4
	Bod 9	1072,5	1470,8	82	150,5	137,1
Vzorek 5	Bod 5	1047,8	1470,8	104	152,2	140,4
	Bod 6	1047,8	1462,8	99	151,9	139,6
	Bod 7	1056,0	1407,2	97	144,6	133,3
	Bod 8	1089,0	1510,5	84	151,9	138,7
	Bod 9	1056,0	1462,8	89	151,6	138,5
μ		1083,1	1466,6	86,4	148,0	135,4
σ		23,8	56,4	8,0	5,9	5,1

Tab. 15: Výsledky testu při zbytkovém kyslíku 100 ppm roztékavosti pájky pro velké body

Pro měřicí body 1 až 4						
		po natisknutí ( $\mu\text{m}$ )	po přetavení ( $\mu\text{m}$ )	výška vrchlíku ( $\mu\text{m}$ )	d (%) s vrchlíkem	d (%)
Vzorek 1	Bod 1	3116,4	3172,1	160	101,5	101,8
	Bod 2	3076,7	3104,5	166	100,4	100,9
	Bod 3	3084,6	3164,1	143	102,9	102,6
	Bod 4	3144,2	3207,8	157	101,9	102,0
Vzorek 2	Bod 1	3077,1	3139,5	159	101,8	102,0
	Bod 2	3077,1	3127,8	140	102,1	101,6
	Bod 3	3084,9	3088,8	150	100,1	100,1
	Bod 4	3069,3	3131,7	156	101,9	102,0
Vzorek 3	Bod 1	3026,4	3069,3	137	101,9	101,4
	Bod 2	3022,5	3088,8	131	103,0	102,2
	Bod 3	3077,1	3151,2	145	102,7	102,4
	Bod 4	3092,7	3155,1	156	101,9	102,0
Vzorek 4	Bod 1	3035,8	3130,3	135	103,8	103,1
	Bod 2	3047,6	3157,9	123	104,7	103,6
	Bod 3	3051,6	3079,1	114	102,2	100,9
	Bod 4	3051,6	3114,6	119	103,2	102,1
Vzorek 5	Bod 1	3142,1	3173,6	140	101,4	101,0
	Bod 2	3157,9	3189,4	131	101,7	101,0
	Bod 3	3146,1	3027,9	135	96,6	96,2
	Bod 4	3138,2	3094,9	134	99,1	98,6
$\mu$		3086,0	3128,4	141,6	101,7	101,4
$\sigma$		42,0	45,0	14,5	1,8	1,6

Tab. 16: Výsledky testu při zbytkovém kyslíku 100 ppm roztékavosti pájky pro malé body

Pro měřicí body 5 až 9						
		po natisknutí ( $\mu\text{m}$ )	po přetavení ( $\mu\text{m}$ )	výška vrchlíku ( $\mu\text{m}$ )	d (%) s vrchlíkem	d (%)
Vzorek 1	Bod 5	1097,1	1347,5	91	132,7	122,8
	Bod 6	1121,0	1502,6	97	144,8	134,0
	Bod 7	1085,2	1383,3	108	136,4	127,5
	Bod 8	1073,3	1359,5	109	135,4	126,7
	Bod 9	1097,1	1355,5	107	131,8	123,6
Vzorek 2	Bod 5	1095,9	1392,3	91	137,6	127,0
	Bod 6	1115,4	1372,8	91	132,8	123,1
	Bod 7	1095,9	1318,2	90	129,8	120,3
	Bod 8	1076,4	1329,9	83	134,6	123,6
	Bod 9	1095,9	1353,3	76	135,0	123,5
Vzorek 3	Bod 5	1045,2	1236,3	84	128,7	118,3
	Bod 6	1056,9	1244,1	96	126,6	117,7
	Bod 7	1049,1	1279,2	81	133,3	121,9
	Bod 8	1072,5	1310,4	83	133,1	122,2
	Bod 9	1084,2	1400,1	83	141,0	129,1
Vzorek 4	Bod 5	1047,4	1299,4	94	134,3	124,1
	Bod 6	1027,7	1275,8	83	135,9	124,1
	Bod 7	1031,6	1299,4	80	138,3	126,0
	Bod 8	1023,8	1252,1	86	133,5	122,3
	Bod 9	1019,8	1287,6	85	138,3	126,3
Vzorek 5	Bod 5	1130,1	1350,6	84	129,2	119,5
	Bod 6	1102,5	1267,9	95	123,1	115,0
	Bod 7	1094,6	1295,4	93	127,3	118,3
	Bod 8	1106,4	1330,9	86	130,2	120,3
	Bod 9	1078,9	1248,2	87	125,0	115,7
$\mu$		1077,0	1323,7	89,7	133,1	122,9
$\sigma$		31,5	60,8	8,7	5,0	4,3

Tab. 17: Výsledky testu při zbytkovém kyslíku 50 ppm roztékavosti pájky pro velké body

Pro měřící body 1 až 4						
		po natisknutí ( $\mu\text{m}$ )	po přetavení ( $\mu\text{m}$ )	výška vrchlíku ( $\mu\text{m}$ )	d (%) s vrchlíkem	d (%)
Vzorek 1	Bod 1	3134,3	3165,8	157	100,8	101,0
	Bod 2	3157,9	3138,2	143	99,6	99,4
	Bod 3	3138,2	3177,6	143	101,6	101,3
	Bod 4	3106,7	3181,5	131	103,2	102,4
Vzorek 2	Bod 1	3134,3	3146,1	126	101,2	100,4
	Bod 2	3165,8	3153,9	129	100,3	99,6
	Bod 3	3134,3	3200,9	125	103,1	102,1
	Bod 4	3114,6	3142,2	126	101,7	100,9
Vzorek 3	Bod 1	3020,5	2796,5	163	91,7	92,6
	Bod 2	2958,7	2676,7	134	90,5	90,5
	Bod 3	3105,5	3151,8	151	101,5	101,5
	Bod 4	3151,8	3136,4	166	99,0	99,5
Vzorek 4	Bod 1	2962,5	2958,7	120	100,9	99,9
	Bod 2	2896,9	2920,1	136	101,4	100,8
	Bod 3	2958,7	2978,0	133	101,3	100,7
	Bod 4	2981,9	2966,4	135	100,0	99,5
Vzorek 5	Bod 1	3063,0	3074,6	142	100,7	100,4
	Bod 2	3128,6	3140,2	154	100,3	100,4
	Bod 3	3317,9	3360,4	199	99,8	101,3
	Bod 4	3267,7	3279,3	183	99,3	100,4
$\mu$		3095,0	3087,2	144,8	99,9	99,7
$\sigma$		105,9	161,4	20,6	3,2	2,9

Tab. 18: Výsledky testu při zbytkovém kyslíku 50 ppm roztékavosti pájky pro malé body

Pro měřící body 5 až 9						
		po natisknutí (μm)	po přetavení (μm)	výška vrchlíku (μm)	d (%) s vrchlíkem	d (%)
Vzorek 1	Bod 5	1067,1	1346,6	97	136,3	126,2
	Bod 6	1082,8	1319,1	90	131,8	121,8
	Bod 7	1078,9	1362,4	104	135,5	126,3
	Bod 8	1078,9	1303,3	99	129,7	120,8
	Bod 9	1078,9	1358,4	93	136,2	125,9
Vzorek 2	Bod 5	1094,6	1281,2	81	127,0	117,0
	Bod 6	1051,3	1242,0	85	128,4	118,1
	Bod 7	1059,2	1257,6	80	129,5	118,7
	Bod 8	1078,9	1289,0	77	130,5	119,5
	Bod 9	1082,8	1281,2	82	128,6	118,3
Vzorek 3	Bod 5	1012,0	1216,7	91	130,6	120,2
	Bod 6	1046,7	1371,2	103	141,4	131,0
	Bod 7	1012,0	1193,5	84	128,7	117,9
	Bod 8	1023,6	1290,1	100	136,2	126,0
	Bod 9	1046,7	1274,6	100	131,0	121,8
Vzorek 4	Bod 5	1012,0	1201,2	180	118,5	118,7
	Bod 6	1004,3	1247,6	176	125,4	124,2
	Bod 7	1004,3	1243,7	184	124,1	123,8
	Bod 8	988,8	1255,3	187	127,4	127,0
	Bod 9	1019,7	1228,3	181	120,4	120,5
Vzorek 5	Bod 5	1093,1	1255,3	98	122,7	114,8
	Bod 6	1039,0	1236,0	94	128,5	119,0
	Bod 7	1050,6	1216,7	85	125,7	115,8
	Bod 8	1050,6	1332,6	95	137,4	126,8
	Bod 9	1209,0	1456,2	105	127,6	120,5
μ		1054,6	1282,4	110,0	129,6	121,6
σ		44,9	62,4	37,4	5,5	4,1



Tab. 19: Výsledky testu při zbytkovém kyslíku 20 ppm roztékavosti pájky pro velké body

Pro měřící body 1 až 4						
		po natisknutí ( $\mu\text{m}$ )	po přetavení ( $\mu\text{m}$ )	výška vrchlíku ( $\mu\text{m}$ )	d (%) s vrchlíkem	d (%)
Vzorek 1	Bod 1	3140,2	3109,3	137	99,4	99,0
	Bod 2	2974,1	3032,1	139	102,4	101,9
	Bod 3	3005,0	3016,6	136	100,9	100,4
	Bod 4	3120,9	3132,5	135	100,9	100,4
Vzorek 2	Bod 1	3120,9	3109,3	139	100,0	99,6
	Bod 2	3051,4	3147,9	143	103,6	103,2
	Bod 3	3074,6	3074,6	148	100,1	100,0
	Bod 4	3093,9	3101,6	140	100,6	100,2
Vzorek 3	Bod 1	3090,0	3078,4	140	99,9	99,6
	Bod 2	3101,6	3086,1	143	99,7	99,5
	Bod 3	3078,4	3105,5	143	101,2	100,9
	Bod 4	3082,3	3109,3	142	101,2	100,9
Vzorek 4	Bod 1	3020,5	3082,3	141	102,5	102,0
	Bod 2	3005,0	3066,8	140	102,5	102,1
	Bod 3	3043,7	3063,0	140	101,0	100,6
	Bod 4	3039,8	3090,0	136	102,2	101,7
Vzorek 5	Bod 1	3066,8	3105,5	144	101,5	101,3
	Bod 2	3051,4	3128,6	136	103,1	102,5
	Bod 3	3063,0	3128,6	143	102,5	102,1
	Bod 4	3093,9	3132,5	137	101,8	101,2
$\mu$		3065,9	3095,0	140,1	101,4	101,0
$\sigma$		42,9	33,7	3,4	1,2	1,1

Tab. 20: Výsledky testu při zbytkovém kyslíku 20 ppm roztékavosti pájky pro malé body

Pro měřící body 5 až 9						
		po natisknutí ( $\mu\text{m}$ )	po přetavení ( $\mu\text{m}$ )	výška vrchlíku ( $\mu\text{m}$ )	d (%) s vrchlíkem	d (%)
Vzorek 1	Bod 5	1004,3	1290,1	87	140,8	128,5
	Bod 6	1104,7	1460,0	85	144,0	132,2
	Bod 7	1008,1	1274,6	94	137,6	126,4
	Bod 8	992,7	1228,3	90	135,1	123,7
	Bod 9	1008,1	1243,7	84	135,1	123,4
Vzorek 2	Bod 5	1108,5	1394,4	97	135,3	125,8
	Bod 6	1124,0	1398,2	97	133,6	124,4
	Bod 7	1131,7	1328,7	97	125,5	117,4
	Bod 8	1104,7	1336,4	90	130,6	121,0
	Bod 9	1104,7	1317,1	100	127,5	119,2
Vzorek 3	Bod 5	1120,1	1363,5	94	130,9	121,7
	Bod 6	1131,7	1332,6	91	126,5	117,7
	Bod 7	1124,0	1328,7	94	126,8	118,2
	Bod 8	1116,3	1324,8	97	127,1	118,7
	Bod 9	1112,4	1293,9	95	124,6	116,3
Vzorek 4	Bod 5	1081,5	1309,4	87	131,2	121,1
	Bod 6	1081,5	1305,5	94	130,1	120,7
	Bod 7	1093,1	1266,9	96	124,2	115,9
	Bod 8	1062,2	1270,8	93	129,1	119,6
	Bod 9	1116,3	1317,1	93	126,7	118,0
Vzorek 5	Bod 5	1104,7	1332,6	87	130,5	120,6
	Bod 6	1100,8	1351,9	87	133,0	122,8
	Bod 7	1112,4	1344,2	100	129,3	120,8
	Bod 8	1112,4	1355,7	96	130,9	121,9
	Bod 9	1108,5	1394,4	98	135,2	125,8
$\mu$		1090,8	1326,5	92,9	131,2	121,7
$\sigma$		42,0	51,9	4,7	5,0	3,9

## A.2 Vyhodnocení pájecích obrazců pro pájecí slitinu SN100C

Tab. 21: Výsledky testu bez ochranné atmosféry roztékavosti pájky pro velké body

Pro měřicí body 1 až 4						
		po natisknutí ( $\mu\text{m}$ )	po přetavení ( $\mu\text{m}$ )	výška vrchlíku ( $\mu\text{m}$ )	d (%) s vrchlíkem	d (%)
Vzorek 1	Bod 1	3001,2	3063,0	133,0	102,8	102,1
	Bod 2	2966,4	3086,1	126,0	105,1	104,0
	Bod 3	3016,6	3078,4	140,0	102,5	102,0
	Bod 4	2978,0	3063,0	137,0	103,5	102,9
Vzorek 2	Bod 1	3035,9	3086,1	131,0	102,4	101,7
	Bod 2	2974,1	3078,4	134,0	104,3	103,5
	Bod 3	2978,0	3055,2	114,0	104,0	102,6
	Bod 4	3032,1	3090,0	124,0	102,9	101,9
Vzorek 3	Bod 1	3012,8	3109,3	136,0	103,9	103,2
	Bod 2	3032,1	3120,9	146,0	103,2	102,9
	Bod 3	2981,9	3059,1	136,0	103,2	102,6
	Bod 4	2993,4	3059,1	138,0	102,7	102,2
Vzorek 4	Bod 1	2954,8	3120,9	146,0	106,1	105,6
	Bod 2	3001,2	3151,8	136,0	105,8	105,0
	Bod 3	2943,2	3101,6	137,0	106,1	105,4
	Bod 4	2920,1	3059,1	130,0	105,7	104,8
Vzorek 5	Bod 1	2993,4	3016,6	140,0	101,2	100,8
	Bod 2	2947,1	3035,9	135,0	103,7	103,0
	Bod 3	2978,0	3059,1	133,0	103,5	102,7
	Bod 4	2978,0	3074,6	135,0	103,9	103,2
$\mu$		2985,9	3078,4	134,4	103,8	103,1
$\sigma$		31,1	31,5	7,2	1,4	1,3

Tab. 22: Výsledky testu bez ochranné atmosféry roztékavosti pájky pro malé body

Pro měřící body 5 až 9						
		po natisknutí ( $\mu\text{m}$ )	po přetavení ( $\mu\text{m}$ )	výška vrchlíku ( $\mu\text{m}$ )	d (%) s vrchlíkem	d (%)
Vzorek 1	Bod 5	1066,1	1062,2	132,0	101,5	99,6
	Bod 6	1012,0	1054,5	127,0	107,6	104,2
	Bod 7	1015,8	1066,1	130,0	108,1	104,9
	Bod 8	1054,5	1050,6	126,0	102,2	99,6
	Bod 9	1054,5	1081,5	133,0	104,9	102,6
Vzorek 2	Bod 5	1023,6	1035,2	137,0	102,8	101,1
	Bod 6	1089,2	1089,2	136,0	101,5	100,0
	Bod 7	1035,2	1027,4	126,0	101,8	99,3
	Bod 8	1035,2	1042,9	118,0	104,5	100,7
	Bod 9	1050,6	1089,2	131,0	106,4	103,7
Vzorek 3	Bod 5	1062,2	1081,5	130,0	104,3	101,8
	Bod 6	1042,9	1050,6	135,0	102,5	100,7
	Bod 7	1066,1	1027,4	127,0	98,3	96,4
	Bod 8	1054,5	1031,3	131,0	99,5	97,8
	Bod 9	1042,9	1058,3	127,0	104,3	101,5
Vzorek 4	Bod 5	1046,7	1081,5	137,0	105,3	103,3
	Bod 6	1039,0	1062,2	133,0	104,5	102,2
	Bod 7	1031,3	1081,5	141,0	106,7	104,9
	Bod 8	1042,9	1054,5	130,0	103,5	101,1
	Bod 9	1050,6	1085,4	127,0	106,4	103,3
Vzorek 5	Bod 5	1023,6	1058,3	129,0	106,4	103,4
	Bod 6	1023,6	1035,2	135,0	103,0	101,1
	Bod 7	1035,2	1050,6	138,0	103,1	101,5
	Bod 8	1039,0	1050,6	135,0	103,0	101,1
	Bod 9	1039,0	1035,2	138,0	100,9	99,6
$\mu$		1043,0	1057,7	131,6	103,7	101,4
$\sigma$		17,4	20,0	5,1	2,5	2,1

Tab. 23: Výsledky testu při zbytkovém kyslíku 5000 ppm roztékavosti pájky pro velké body

Pro měřící body 1 až 4						
		po natisknutí ( $\mu\text{m}$ )	po přetavení ( $\mu\text{m}$ )	výška vrchlíku ( $\mu\text{m}$ )	d (%) s vrchlíkem	d (%)
Vzorek 1	Bod 1	3008,9	3078,4	128,0	103,2	102,3
	Bod 2	2989,6	3055,2	147,0	102,4	102,2
	Bod 3	2989,6	3097,7	147,0	103,9	103,6
	Bod 4	3005,0	3047,5	129,0	102,2	101,4
Vzorek 2	Bod 1	2989,6	3047,5	140,0	102,4	101,9
	Bod 2	3008,9	3063,0	135,0	102,4	101,8
	Bod 3	2993,4	3047,5	144,0	102,1	101,8
	Bod 4	3001,2	3047,5	138,0	102,0	101,5
Vzorek 3	Bod 1	2951,0	2993,4	139,0	101,9	101,4
	Bod 2	2916,2	2997,3	138,0	103,4	102,8
	Bod 3	2939,4	3055,2	127,0	105,0	103,9
	Bod 4	2985,7	3039,8	129,0	102,6	101,8
Vzorek 4	Bod 1	2958,7	3086,1	129,0	105,3	104,3
	Bod 2	2985,7	3086,1	147,0	103,6	103,4
	Bod 3	2978,0	3059,1	142,0	103,2	102,7
	Bod 4	3008,9	3063,0	134,0	102,5	101,8
Vzorek 5	Bod 1	2970,3	3028,2	139,0	102,4	102,0
	Bod 2	2997,3	3016,6	122,0	101,7	100,6
	Bod 3	2962,5	3012,8	134,0	102,4	101,7
	Bod 4	2935,5	3032,1	136,0	104,0	103,3
$\mu$		2978,8	3047,7	136,2	102,9	102,3
$\sigma$		26,9	28,5	7,3	1,0	1,0

Tab. 24: Výsledky testu při zbytkovém kyslíku 5000 ppm roztékavosti pájky pro malé body

Pro měřící body 5 až 9						
		po natisknutí (μm)	po přetavení (μm)	výška vrchlíku (μm)	d (%) s vrchlíkem	d (%)
Vzorek 1	Bod 5	1066,1	1127,9	118,0	110,2	105,8
	Bod 6	1054,5	1158,8	112,0	115,7	109,9
	Bod 7	1062,2	1124,0	120,0	110,1	105,8
	Bod 8	1035,2	1143,3	119,0	115,7	110,4
	Bod 9	1039,0	1162,6	123,0	116,9	111,9
Vzorek 2	Bod 5	1019,7	1112,4	130,0	113,0	109,1
	Bod 6	1012,0	1100,8	128,0	112,9	108,8
	Bod 7	1023,6	1081,5	130,0	108,9	105,7
	Bod 8	1039,0	1108,5	121,0	111,1	106,7
	Bod 9	1046,7	1089,2	134,0	106,5	104,1
Vzorek 3	Bod 5	984,9	1004,3	111,0	107,0	102,0
	Bod 6	1000,4	1027,4	113,0	107,5	102,7
	Bod 7	1004,3	1008,1	115,0	104,5	100,4
	Bod 8	977,2	1008,1	105,0	109,2	103,2
	Bod 9	1035,2	1054,5	119,0	105,7	101,9
Vzorek 4	Bod 5	1042,9	1069,9	129,0	105,4	102,6
	Bod 6	1019,7	1108,5	140,0	111,4	108,7
	Bod 7	1019,7	1104,7	131,0	112,0	108,3
	Bod 8	1058,3	1093,1	123,0	106,8	103,3
	Bod 9	1054,5	1100,8	127,0	107,7	104,4
Vzorek 5	Bod 5	1004,3	1104,7	154,0	111,3	110,0
	Bod 6	1004,3	1046,7	112,0	109,4	104,2
	Bod 7	996,5	1081,5	112,0	114,5	108,5
	Bod 8	1058,3	1081,5	98,0	108,3	102,2
	Bod 9	1004,3	1058,3	114,0	110,5	105,4
μ		1026,5	1086,4	121,5	110,1	105,8
σ		25,5	44,0	11,8	3,4	3,2

Tab. 25: Výsledky testu při zbytkovém kyslíku 1000 ppm roztékavosti pájky pro velké body

Pro měřící body 1 až 4						
		po natisknutí ( $\mu\text{m}$ )	po přetavení ( $\mu\text{m}$ )	výška vrchlíku ( $\mu\text{m}$ )	d (%) s vrchlíkem	d (%)
Vzorek 1	Bod 1	3059,1	3164,1	130,0	104,3	103,4
	Bod 2	3043,7	3160,1	126,0	104,9	103,8
	Bod 3	3032,1	3195,9	135,0	106,2	105,4
	Bod 4	3008,9	3128,3	141,0	104,5	104,0
Vzorek 2	Bod 1	3082,3	3195,9	139,0	104,3	103,7
	Bod 2	3070,7	3160,1	114,0	104,3	102,9
	Bod 3	3078,4	3188,0	146,0	103,9	103,6
	Bod 4	3039,8	3152,2	137,0	104,3	103,7
Vzorek 3	Bod 1	3005,0	3164,1	116,0	106,8	105,3
	Bod 2	3039,8	3156,2	122,0	105,0	103,8
	Bod 3	3032,1	3120,4	124,0	104,0	102,9
	Bod 4	3008,9	3068,7	127,0	102,9	102,0
Vzorek 4	Bod 1	2989,6	3120,4	134,0	105,2	104,4
	Bod 2	2981,9	3108,5	135,0	105,0	104,2
	Bod 3	2985,7	3120,4	135,0	105,3	104,5
	Bod 4	3028,2	3112,4	139,0	103,3	102,8
Vzorek 5	Bod 1	3016,6	3140,3	116,0	105,5	104,1
	Bod 2	3016,6	3136,3	120,0	105,2	104,0
	Bod 3	3020,5	3124,4	125,0	104,5	103,4
	Bod 4	3039,8	3108,5	122,0	103,3	102,3
$\mu$		3029,0	3141,2	129,2	104,6	103,7
$\sigma$		28,9	32,7	9,3	0,9	0,9

Tab. 26: Výsledky testu při zbytkovém kyslíku 1000 ppm roztékavosti pájky pro malé body

Pro měřící body 5 až 9						
		po natisknutí ( $\mu\text{m}$ )	po přetavení ( $\mu\text{m}$ )	výška vrchlíku ( $\mu\text{m}$ )	d (%) s vrchlíkem	d (%)
Vzorek 1	Bod 5	1124,0	1228,3	128,0	113,0	109,3
	Bod 6	1069,9	1172,6	125,0	113,9	109,6
	Bod 7	1073,8	1180,6	127,0	114,1	109,9
	Bod 8	1081,5	1188,5	124,0	114,3	109,9
	Bod 9	1066,1	1176,6	129,0	114,4	110,4
Vzorek 2	Bod 5	1100,8	1180,6	119,0	111,6	107,2
	Bod 6	1073,8	1121,0	126,0	107,7	104,4
	Bod 7	1100,8	1140,8	125,0	106,8	103,6
	Bod 8	1089,2	1124,9	131,0	105,8	103,3
	Bod 9	1085,4	1121,0	132,0	105,7	103,3
Vzorek 3	Bod 5	1100,8	1164,7	119,0	110,0	105,8
	Bod 6	1069,9	1124,9	113,0	110,0	105,1
	Bod 7	1093,1	1156,7	112,0	110,8	105,8
	Bod 8	1062,2	1132,9	117,0	111,4	106,7
	Bod 9	1058,3	1124,9	122,0	110,4	106,3
Vzorek 4	Bod 5	1035,2	1105,1	119,0	111,4	106,8
	Bod 6	1046,7	1172,6	110,0	118,5	112,0
	Bod 7	1069,9	1172,6	116,0	114,9	109,6
	Bod 8	1035,2	1192,5	108,0	122,5	115,2
	Bod 9	1062,2	1152,8	114,0	113,9	108,5
Vzorek 5	Bod 5	1066,1	1136,9	116,0	111,4	106,6
	Bod 6	1069,9	1113,0	121,0	107,8	104,0
	Bod 7	1073,8	1136,9	113,0	110,8	105,9
	Bod 8	1081,5	1164,7	110,0	113,2	107,7
	Bod 9	1085,4	1128,9	97,0	110,3	104,0
$\mu$		1075,0	1152,6	118,9	111,8	107,2
$\sigma$		20,5	30,3	8,3	3,8	3,0



Tab. 27: Výsledky testu při zbytkovém kyslíku 500 ppm roztékavosti pájky pro velké body

Pro měřicí body 1 až 4						
		po natisknutí ( $\mu\text{m}$ )	po přetavení ( $\mu\text{m}$ )	výška vrchlíku ( $\mu\text{m}$ )	d (%) s vrchlíkem	d (%)
Vzorek 1	Bod 1	3020,5	3112,4	142,0	103,5	103,0
	Bod 2	3016,6	3136,3	141,0	104,5	104,0
	Bod 3	2974,1	3184,0	142,0	107,7	107,1
	Bod 4	3005,0	3148,2	123,0	106,0	104,8
Vzorek 2	Bod 1	3016,6	3092,6	136,0	103,1	102,5
	Bod 2	3001,2	3084,6	135,0	103,5	102,8
	Bod 3	2966,4	3112,4	121,0	106,2	104,9
	Bod 4	3012,8	3112,4	128,0	104,3	103,3
Vzorek 3	Bod 1	2974,1	3036,9	127,0	103,0	102,1
	Bod 2	2962,5	3029,0	123,0	103,3	102,2
	Bod 3	2974,1	3092,6	125,0	105,1	104,0
	Bod 4	2954,8	3068,7	140,0	104,4	103,9
Vzorek 4	Bod 1	2966,4	3064,7	130,0	104,2	103,3
	Bod 2	2978,0	3068,7	126,0	104,1	103,0
	Bod 3	2978,0	3060,8	125,0	103,8	102,8
	Bod 4	2951,0	3064,7	135,0	104,6	103,9
Vzorek 5	Bod 1	2927,8	3060,8	133,0	105,4	104,5
	Bod 2	2958,7	3025,0	143,0	102,6	102,2
	Bod 3	2970,3	3116,4	136,0	105,7	104,9
	Bod 4	2981,9	3060,8	133,0	103,4	102,6
$\mu$		2979,5	3086,6	132,2	104,4	103,6
$\sigma$		25,1	41,0	7,2	1,3	1,2

Tab. 28: Výsledky testu při zbytkovém kyslíku 500 ppm roztékavosti pájky pro malé body

Pro měřicí body 5 až 9						
		po natisknutí (μm)	po přetavení (μm)	výška vrchlíku (μm)	d (%) s vrchlíkem	d (%)
Vzorek 1	Bod 5	1062,2	1188,5	130,0	116,0	111,9
	Bod 6	1027,4	1152,8	123,0	117,4	112,2
	Bod 7	1027,4	1184,6	116,0	121,8	115,3
	Bod 8	1027,4	1152,8	114,0	118,4	112,2
	Bod 9	1035,2	1204,4	117,0	122,9	116,4
Vzorek 2	Bod 5	1039,0	1148,8	125,0	115,2	110,6
	Bod 6	1012,0	1136,9	117,0	118,3	112,3
	Bod 7	1039,0	1144,8	117,0	115,6	110,2
	Bod 8	1035,2	1144,8	116,0	116,2	110,6
	Bod 9	1023,6	1121,0	120,0	114,6	109,5
Vzorek 3	Bod 5	1019,7	1176,6	112,0	122,4	115,4
	Bod 6	1023,6	1148,8	112,0	118,7	112,2
	Bod 7	1035,2	1176,6	113,0	120,2	113,7
	Bod 8	1031,3	1172,6	115,0	120,0	113,7
	Bod 9	1046,7	1172,6	110,0	118,5	112,0
Vzorek 4	Bod 5	1004,3	1097,1	79,0	119,2	109,2
	Bod 6	996,5	1184,6	111,0	126,8	118,9
	Bod 7	1008,1	1121,0	109,0	117,9	111,2
	Bod 8	1000,4	1093,1	114,0	115,1	109,3
	Bod 9	1012,0	1136,9	98,0	120,5	112,3
Vzorek 5	Bod 5	996,5	1188,5	118,0	126,5	119,3
	Bod 6	1023,6	1085,3	66,0	116,7	106,0
	Bod 7	1019,7	1140,8	115,0	118,0	111,9
	Bod 8	1039,0	1144,8	119,0	115,4	110,2
	Bod 9	1058,3	1144,8	104,0	114,6	108,2
μ		1025,7	1150,5	111,6	118,7	112,2
σ		17,4	31,1	13,5	3,4	3,1

Tab. 29: Výsledky testu při zbytkovém kyslíku 200 ppm roztékavosti pájky pro velké body

Pro měřící body 1 až 4						
		po natisknutí (μm)	po přetavení (μm)	výška vrchlíku (μm)	d (%) s vrchlíkem	d (%)
Vzorek 1	Bod 1	3035,9	3039,8	84,0	102,4	100,1
	Bod 2	2966,4	3008,9	137,0	102,0	101,4
	Bod 3	2989,6	3035,9	143,0	101,9	101,6
	Bod 4	2958,7	3070,7	139,0	104,4	103,8
Vzorek 2	Bod 1	3016,6	3001,2	129,0	100,2	99,5
	Bod 2	3039,8	3043,7	139,0	100,5	100,1
	Bod 3	3043,7	3032,1	145,0	99,8	99,6
	Bod 4	3012,8	3028,2	151,0	100,5	100,5
Vzorek 3	Bod 1	2935,5	2985,7	121,0	102,8	101,7
	Bod 2	2927,8	3001,2	125,0	103,5	102,5
	Bod 3	2954,8	2993,4	120,0	102,4	101,3
	Bod 4	2923,9	2993,4	126,0	103,4	102,4
Vzorek 4	Bod 1	3032,1	3055,2	141,0	101,1	100,8
	Bod 2	3055,2	3047,5	143,0	100,0	99,7
	Bod 3	3059,1	3059,1	140,0	100,3	100,0
	Bod 4	3063,0	3059,1	136,0	100,3	99,9
Vzorek 5	Bod 1	2981,9	3039,8	140,0	102,4	101,9
	Bod 2	2966,4	3047,5	130,0	103,6	102,7
	Bod 3	2981,9	3039,8	134,0	102,6	101,9
	Bod 4	2993,4	3074,6	137,0	103,3	102,7
μ		2996,9	3032,8	133,0	101,9	101,2
σ		45,0	26,8	14,1	1,4	1,2

Tab. 30: Výsledky testu při zbytkovém kyslíku 200 ppm roztékavosti pájky pro malé body

Pro měřící body 5 až 9						
		po natisknutí (μm)	po přetavení (μm)	výška vrchlíku (μm)	d (%) s vrchlíkem	d (%)
Vzorek 1	Bod 5	1035,2	1077,6	120,0	108,2	104,1
	Bod 6	1042,9	1124,0	124,0	112,0	107,8
	Bod 7	1019,7	1120,1	121,0	114,9	109,8
	Bod 8	957,9	1089,2	121,0	119,8	113,7
	Bod 9	1031,3	1108,5	126,0	111,5	107,5
Vzorek 2	Bod 5	1058,3	1104,7	117,0	108,7	104,4
	Bod 6	1066,1	1120,1	114,0	109,8	105,1
	Bod 7	1100,8	1104,7	119,0	103,7	100,4
	Bod 8	1073,8	1127,9	108,0	110,4	105,0
	Bod 9	1081,5	1143,3	127,0	109,1	105,7
Vzorek 3	Bod 5	996,5	1093,1	110,0	116,1	109,7
	Bod 6	1000,4	1031,3	132,0	105,7	103,1
	Bod 7	1004,3	1089,2	114,0	114,2	108,5
	Bod 8	1008,1	1112,4	99,0	118,1	110,3
	Bod 9	996,5	1089,2	107,0	116,0	109,3
Vzorek 4	Bod 5	1112,4	1174,2	116,0	110,0	105,6
	Bod 6	1089,2	1178,1	122,0	112,4	108,2
	Bod 7	1073,8	1201,3	114,0	117,7	111,9
	Bod 8	1073,8	1162,6	113,0	113,6	108,3
	Bod 9	1054,5	1185,8	118,0	118,1	112,5
Vzorek 5	Bod 5	1035,2	1120,1	114,0	113,7	108,2
	Bod 6	1050,6	1147,2	115,0	114,6	109,2
	Bod 7	1042,9	1143,3	116,0	115,1	109,6
	Bod 8	1054,5	1154,9	119,0	114,5	109,5
	Bod 9	1035,2	1112,4	116,0	112,6	107,5
μ		1043,8	1124,6	116,9	112,8	107,8
σ		36,9	38,5	6,9	4,0	3,1

Tab. 31: Výsledky testu při zbytkovém kyslíku 100 ppm roztékavosti pájky pro velké body

Pro měřící body 1 až 4						
		po natisknutí ( $\mu\text{m}$ )	po přetavení ( $\mu\text{m}$ )	výška vrchlíku ( $\mu\text{m}$ )	d (%) s vrchlíkem	d (%)
Vzorek 1	Bod 1	2985,7	3001,2	135,0	101,1	100,5
	Bod 2	3001,2	3001,2	139,0	100,4	100,0
	Bod 3	3012,8	3035,9	143,0	101,1	100,8
	Bod 4	3008,9	3039,8	135,0	101,6	101,0
Vzorek 2	Bod 1	3012,8	3066,8	138,0	102,3	101,8
	Bod 2	3020,5	3063,0	143,0	101,7	101,4
	Bod 3	3016,6	3074,6	145,0	102,2	101,9
	Bod 4	2981,9	3047,5	140,0	102,7	102,2
Vzorek 3	Bod 1	3035,9	3088,6	135,0	102,3	101,7
	Bod 2	3020,5	3096,5	134,0	103,2	102,5
	Bod 3	3016,6	3088,6	132,0	103,1	102,4
	Bod 4	3012,8	3100,5	131,0	103,7	102,9
Vzorek 4	Bod 1	3024,3	3084,6	136,0	102,6	102,0
	Bod 2	3043,7	3076,7	140,0	101,5	101,1
	Bod 3	3035,9	3124,4	141,0	103,4	102,9
	Bod 4	3008,9	3144,2	133,0	105,3	104,5
Vzorek 5	Bod 1	2978,0	3108,5	132,0	105,2	104,4
	Bod 2	2985,7	3108,5	136,0	104,8	104,1
	Bod 3	2997,3	3164,1	138,0	106,3	105,6
	Bod 4	3012,8	3108,5	135,0	103,9	103,2
$\mu$		3010,6	3081,2	137,1	102,9	102,3
$\sigma$		18,1	42,3	4,0	1,6	1,5

Tab. 32: Výsledky testu při zbytkovém kyslíku 100 ppm roztékavosti pájky pro malé body

Pro měřící body 5 až 9						
		po natisknutí (μm)	po přetavení (μm)	výška vrchlíku (μm)	d (%) s vrchlíkem	d (%)
Vzorek 1	Bod 5	1042,9	1120,1	128,0	111,1	107,4
	Bod 6	1023,6	1089,2	118,0	111,2	106,4
	Bod 7	1039,0	1127,9	112,0	114,3	108,6
	Bod 8	1035,2	1120,1	129,0	112,0	108,2
	Bod 9	1058,3	1135,6	115,0	112,4	107,3
Vzorek 2	Bod 5	1039,0	1181,9	117,0	119,8	113,8
	Bod 6	1023,6	1147,2	117,0	117,9	112,1
	Bod 7	1042,9	1154,9	107,0	117,4	110,7
	Bod 8	1035,2	1139,4	117,0	115,5	110,1
	Bod 9	1023,6	1127,9	102,0	117,4	110,2
Vzorek 3	Bod 5	1050,6	1200,5	116,0	120,4	114,3
	Bod 6	1085,4	1204,4	125,0	115,4	111,0
	Bod 7	1046,7	1192,5	118,0	119,8	113,9
	Bod 8	1073,8	1216,4	115,0	119,2	113,3
	Bod 9	1062,2	1196,5	114,0	118,7	112,6
Vzorek 4	Bod 5	1062,2	1180,6	119,0	116,4	111,1
	Bod 6	1050,6	1220,3	114,0	122,8	116,2
	Bod 7	1066,1	1188,5	122,0	116,4	111,5
	Bod 8	1062,2	1172,6	128,0	114,5	110,4
	Bod 9	1046,7	1196,5	124,0	119,6	114,3
Vzorek 5	Bod 5	1000,4	1164,7	119,0	123,0	116,4
	Bod 6	1015,8	1180,6	126,0	121,8	116,2
	Bod 7	1027,4	1168,7	121,0	119,4	113,7
	Bod 8	1027,4	1208,4	121,0	123,9	117,6
	Bod 9	1023,6	1196,5	118,0	123,5	116,9
μ		1042,6	1169,3	118,5	117,8	112,2
σ		19,9	35,1	6,4	3,8	3,2

Tab. 33: Výsledky testu při zbytkovém kyslíku 50 ppm roztékavosti pájky pro velké body

Pro měřicí body 1 až 4						
		po natisknutí ( $\mu\text{m}$ )	po přetavení ( $\mu\text{m}$ )	výška vrchlíku ( $\mu\text{m}$ )	d (%) s vrchlíkem	d (%)
Vzorek 1	Bod 1	2989,6	3104,5	129,0	104,8	103,8
	Bod 2	2993,4	3104,5	147,0	104,0	103,7
	Bod 3	2989,6	3112,4	147,0	104,4	104,1
	Bod 4	2981,9	3092,6	139,0	104,3	103,7
Vzorek 2	Bod 1	2970,3	3052,8	128,0	103,7	102,8
	Bod 2	2958,7	3092,6	129,0	105,5	104,5
	Bod 3	2962,5	3072,7	120,0	105,0	103,7
	Bod 4	2947,1	2993,2	114,0	102,9	101,6
Vzorek 3	Bod 1	3005,0	3140,3	147,0	104,8	104,5
	Bod 2	3016,6	3156,2	140,0	105,2	104,6
	Bod 3	2985,7	3136,3	149,0	105,3	105,0
	Bod 4	3001,2	3124,4	131,0	105,0	104,1
Vzorek 4	Bod 1	3028,2	3120,4	156,0	103,0	103,0
	Bod 2	3008,9	3144,2	143,0	105,0	104,5
	Bod 3	3020,5	3136,3	150,0	104,0	103,8
	Bod 4	2985,7	3108,5	138,0	104,8	104,1
Vzorek 5	Bod 1	3024,3	3116,4	144,0	103,4	103,0
	Bod 2	3024,3	3104,5	143,0	103,0	102,6
	Bod 3	3016,6	3128,3	133,0	104,5	103,7
	Bod 4	3024,3	3120,4	144,0	103,5	103,2
$\mu$		2996,7	3108,1	138,6	104,3	103,7
$\sigma$		24,3	36,5	10,7	0,8	0,8

Tab. 34: Výsledky testu při zbytkovém kyslíku 50 ppm roztékavosti pájky pro malé body

Pro měřicí body 5 až 9						
		po natisknutí (μm)	po přetavení (μm)	výška vrchlíku (μm)	d (%) s vrchlíkem	d (%)
Vzorek 1	Bod 5	1027,4	1216,4	100,0	127,2	118,4
	Bod 6	1027,4	1216,4	108,0	126,3	118,4
	Bod 7	1015,8	1168,7	104,0	123,0	115,0
	Bod 8	1015,8	1212,4	107,0	127,7	119,3
	Bod 9	1004,3	1113,0	115,0	116,8	110,8
Vzorek 2	Bod 5	996,5	1136,9	117,0	120,5	114,1
	Bod 6	1000,4	1164,7	119,0	123,0	116,4
	Bod 7	1004,3	1172,6	112,0	124,2	116,8
	Bod 8	1000,4	1140,8	100,0	122,4	114,0
	Bod 9	984,9	1049,4	96,0	114,2	106,5
Vzorek 3	Bod 5	1019,7	1260,1	116,0	131,5	123,6
	Bod 6	1046,7	1196,5	115,0	120,6	114,3
	Bod 7	1050,6	1264,1	107,0	128,5	120,3
	Bod 8	1015,8	1248,2	113,0	131,1	122,9
	Bod 9	1027,4	1256,1	115,0	130,1	122,3
Vzorek 4	Bod 5	1039,0	1228,3	125,0	124,1	118,2
	Bod 6	1039,0	1204,4	116,0	122,4	115,9
	Bod 7	1031,3	1204,4	120,0	123,1	116,8
	Bod 8	1015,8	1204,4	120,0	125,2	118,6
	Bod 9	1023,6	1240,2	124,0	127,8	121,2
Vzorek 5	Bod 5	1050,6	1240,2	111,0	125,4	118,0
	Bod 6	1062,2	1216,4	113,0	121,0	114,5
	Bod 7	1039,0	1232,3	123,0	124,8	118,6
	Bod 8	1042,9	1232,3	114,0	125,2	118,2
	Bod 9	1058,3	1224,3	127,0	120,8	115,7
μ		1025,6	1201,7	113,5	124,3	117,2
σ		20,5	50,6	8,0	4,1	3,7



Tab. 35: Výsledky testu při zbytkovém kyslíku 20 ppm roztékavosti pájky pro velké body

Pro měřící body 1 až 4						
		po natisknutí ( $\mu\text{m}$ )	po přetavení ( $\mu\text{m}$ )	výška vrchlíku ( $\mu\text{m}$ )	d (%) s vrchlíkem	d (%)
Vzorek 1	Bod 1	2927,8	3104,5	137,0	106,8	106,0
	Bod 2	3005,0	3100,5	138,0	103,8	103,2
	Bod 3	2935,5	3104,5	128,0	106,9	105,8
	Bod 4	2920,1	3072,7	135,0	106,1	105,2
Vzorek 2	Bod 1	2962,5	3032,9	137,0	103,0	102,4
	Bod 2	2954,8	3072,7	124,0	105,1	104,0
	Bod 3	2954,8	3076,7	138,0	104,8	104,1
	Bod 4	2958,7	3032,9	119,0	103,7	102,5
Vzorek 3	Bod 1	3039,8	3088,6	151,0	101,7	101,6
	Bod 2	2989,6	3048,8	138,0	102,5	102,0
	Bod 3	3032,1	3088,6	140,0	102,3	101,9
	Bod 4	3020,5	3096,5	150,0	102,6	102,5
Vzorek 4	Bod 1	3032,1	3156,2	142,0	104,6	104,1
	Bod 2	3012,8	3160,1	151,0	105,1	104,9
	Bod 3	3024,3	3184,0	135,0	106,1	105,3
	Bod 4	3028,2	3156,2	138,0	104,9	104,2
Vzorek 5	Bod 1	3052,8	3108,5	139,0	102,3	101,8
	Bod 2	3076,7	3108,5	124,0	102,0	101,0
	Bod 3	3072,7	3120,4	140,0	102,0	101,6
	Bod 4	3052,8	3116,4	149,0	102,2	102,1
$\mu$		3002,7	3101,5	137,7	103,9	103,3
$\sigma$		48,8	40,9	8,9	1,7	1,6

Tab. 36: Výsledky testu při zbytkovém kyslíku 20 ppm roztékavosti pájky pro malé body

Pro měřicí body 5 až 9						
		po natisknutí (μm)	po přetavení (μm)	výška vrchlíku (μm)	d (%) s vrchlíkem	d (%)
Vzorek 1	Bod 5	1012,0	1128,9	124,0	116,6	111,6
	Bod 6	1008,1	1164,7	123,0	121,4	115,5
	Bod 7	1004,3	1148,8	110,0	121,6	114,4
	Bod 8	1012,0	1148,8	123,0	119,0	113,5
	Bod 9	1004,3	1105,1	115,0	115,9	110,0
Vzorek 2	Bod 5	1027,4	1148,8	115,0	117,8	111,8
	Bod 6	1004,3	1049,4	117,0	109,1	104,5
	Bod 7	992,7	1105,1	116,0	117,4	111,3
	Bod 8	1012,0	1101,1	112,0	114,7	108,8
	Bod 9	1015,9	1117,0	121,0	115,0	110,0
Vzorek 3	Bod 5	1015,8	1105,1	120,0	113,8	108,8
	Bod 6	1015,8	1168,7	121,0	121,0	115,0
	Bod 7	1042,9	1156,7	118,0	116,3	110,9
	Bod 8	1031,3	1172,6	107,0	120,9	113,7
	Bod 9	1046,7	1148,8	88,0	118,3	109,7
Vzorek 4	Bod 5	1066,1	1232,3	118,0	121,6	115,6
	Bod 6	1050,6	1172,6	114,0	117,5	111,6
	Bod 7	1066,1	1224,3	128,0	119,7	114,8
	Bod 8	1073,8	1184,6	137,0	113,4	110,3
	Bod 9	1069,9	1188,5	126,0	115,5	111,1
Vzorek 5	Bod 5	1065,3	1192,5	117,0	117,5	111,9
	Bod 6	1085,2	1212,4	112,0	117,7	111,7
	Bod 7	1081,2	1248,2	99,0	123,4	115,4
	Bod 8	1057,4	1220,3	120,0	121,3	115,4
	Bod 9	1021,6	1236,2	100,0	130,4	121,0
μ		1035,3	1163,2	116,0	118,3	112,3
σ		28,5	50,0	10,0	4,1	3,2